

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences & Technologie
Département d'Architecture
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المعمارية
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement dans les Zones Arides

Impact des choix formels et constructifs de la façade sur l'adaptabilité climatique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Cas d'un climat chaud et aride

Présentée par :

OUNIS Safieddine

Soutenue publiquement le : 14/06/2022

Devant le jury composé de :

Pr. TAALAH Bachir	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. SRITI Leila	Professeur	Directrice de thèse	Université de Biskra
Pr. HAMOUDA Abida	Professeur	Examineur	Université de Batna
Dr. BERKOUK Djihed	MCA	Examineur	Université de Biskra

Dédicace

Je dédie ce travail de recherche à mon père et à ma mère,

A mes petites sœurs.

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements



Mes premiers remerciements vont à ma directrice de thèse, Professeur Sriti Leila pour qui je voudrai exprimer ma profonde gratitude pour ses précieuses orientations et encouragements.

Je remercie aussi Pr., Niccolo Aste, Pr. Claudio del Pero, Dr. Fabrizio Leonforte et Pr. Rajendra Singh Adhikari pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire ABC et pour leur aide et support continu.

Mes remerciements vont également vers les membres du jury Pr. Taalah Bachir, Pr. Hamouda Abida, et Dr. Berkouk Djihad pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma thèse et pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé et soutenu pour mener ce travail de recherche à bout.

Résumé

En Algérie, l'augmentation alarmante de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, a poussé les autorités publiques à réagir en adoptant le Plan d'efficacité énergétique 2015 à l'horizon 2030, dans lequel une convergence vers l'efficacité énergétique des bâtiments est imposée. Paradoxalement, le secteur tertiaire qui passe pour être le deuxième plus important consommateur d'énergie, n'est pas suffisamment pris en compte dans cette ébauche de réglementation thermique. A cet égard, les directives réglementaires prescrites ciblent principalement l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment en appliquant une approche de limitation des pertes de chaleur en régime permanent. Cependant, le comportement transitoire des murs de façade n'est pas pris en compte, de même que les propriétés dimensionnelles et physiques du vitrage ne sont pas prises en charge par le biais de codes de construction dans un objectif d'efficacité énergétique spécifique au climat. Cette négligence risque de compromettre toutes mesures en faveur de la maîtrise de l'énergie puisque l'enveloppe et sa performance thermique représentent le point de départ pour rendre un bâtiment énergétiquement efficace. La façade, en particulier, a un impact significatif du fait qu'elle représente un lieu d'interaction et d'échange entre l'intérieur et l'extérieur.

Au vu du caractère énergivore à outrance des bâtiments à usage de bureaux, la façade dont la performance relève de facteurs à la fois formels, matériels et techniques, représente un enjeu majeur pour l'adaptabilité climatique et d'efficacité énergétique de ce type de bâtiments. A ce titre, il est supposé que l'adoption de mesures constructives et formelles adéquates relatives à la configuration des composants de la façade, en ce qui concerne leur adaptation à la région chaude et sèche en Algérie, devrait permettre d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment dans sa globalité. Partant de cette hypothèse, la présente recherche a été menée afin de comprendre et d'évaluer l'impact des aspects formels et des composants constructifs de la façade d'un bâtiment de bureaux, et d'examiner jusqu'à quel point les choix matériels permettraient de rationaliser et de libérer les décisions architecturales formelles dans la perspective d'une approche d'adaptabilité climatique et d'efficacité énergétique sous les conditions climatiques chaudes et arides du sud de l'Algérie.

A cette fin, une évaluation énergétique bilatérale a été réalisée sur les surfaces opaques et vitrées d'un modèle énergétique illustrant un bâtiment existant, sélectionné comme représentatif des immeubles de bureaux de Biskra ; cette ville étant représentative des conditions chaudes et arides. Après une analyse conceptuelle et prospective approfondie réalisée sur site, le moteur EnergyPlus a été utilisé pour effectuer la simulation énergétique avec les plugins environnementaux de Ladybug & Honeybee sur la plateforme paramétrique de Grasshopper/Rhino en procédant à une série de variations par une approche itérative de force brute. La performance énergétique des parois opaques a été évaluée et l'impact de son aspect matériel-constructif a été analysé en se basant sur la base de 23 variations de l'épaisseur de l'isolation, en considérant des scénarios de parois légères, mi-lourdes et lourdes et 4 coefficients d'absorption solaire. Les résultats ont démontré que la transmission thermique de la paroi est le facteur qui a le plus d'impact en termes d'énergie opérationnelle, conjointement au coefficient

d'absorption solaire. De légères réductions dues à l'inertie thermique sont à signaler et permettent de désigner la solution mi-lourde comme meilleur scénario. De plus, pour assurer un équilibre entre l'énergie opérationnelle et l'énergie intrinsèque dans une perspective de coût de consommation énergétique durant le cycle de vie du bâtiment, des niveaux d'isolation plus faibles sont requis. Par suite, l'impact de l'aspect formel a été abordé en évaluant le potentiel d'économie d'énergie thermique de la mise en œuvre de panneaux horizontaux variables et d'aillettes verticales comme dispositifs de protection solaire. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation simultanée de ces scénarios d'ombrage présente des coefficients de protection solaire plus élevés, et qu'une configuration adéquate implique des économies d'énergie pour les orientations cardinales et semi-cardinales considérées avec différentes amplitudes.

Dans le second volet de l'étude, l'évaluation et l'optimisation de l'énergie opérationnelle dédiée au refroidissement, au chauffage et à l'éclairage a été réalisée en considérant : cinq types de verre de fenêtre, cinq ratios d'ouverture du mur de la façade (WWR), et en supposant successivement l'absence et la présence d'un système d'ombrage mobile contrôlé pour être ajusté sur les points cardinaux et semi-cardinaux. Les résultats obtenus montrent une corrélation importante entre la consommation d'énergie et des valeurs de WWR élevées, qui devraient être considérées à leur limite inférieure lors de la conception des ouvertures de la façade. De plus, des fenêtres ombragées avec un faible SHGC et U_g et un V_t élevé devraient être adoptées quand il s'agit des conditions climatiques propres à la ville de Biskra ou un contexte similaire chaude et sec.

Finalement, cette étude fournit des orientations en faveur de la performance climatique et énergétique des bâtiments de bureaux, qu'il s'agisse de nouvelles constructions ou de bâtiments en rénovation. En outre, elle présente des outils appropriés d'évaluation et d'aide à la conception qui peuvent être adaptés à d'autres types de bâtiments afin de trouver un équilibre optimal entre confort des utilisateurs, consommation énergétique et incidences environnementales.

Mots clés : *façade de bâtiment, efficacité énergétique, isolation thermique, inertie thermique, vitrage, ombrage, bâtiment tertiaire, climat chaud et aride.*

Abstract

In Algeria, the alarming increase in energy consumption and greenhouse gas emissions has prompted the public authorities to react by adopting the Energy Efficiency Plan 2015 for horizon 2030, in which a convergence towards energy efficiency in buildings is imposed. Paradoxically, the tertiary sector, which is considered to be the second largest energy consumer, is not sufficiently taken into account in this outline of thermal regulations. In such a respect, the prescribed regulatory guidelines mainly target the thermal insulation of the building envelope by applying a steady-state heat loss reduction approach. However, the transient behavior of façade walls is not taken into account, nor are the dimensional and physical properties of glazing addressed through building codes for climate-specific energy efficiency. This neglect risks undermining any measures to control energy, as the envelope and its thermal performance is the starting point for making a building energy efficient. The façade, in particular, has a significant impact as it represents a place of interaction and exchange between the interior and the exterior.

In view of the excessive energy consumption of office buildings, the façade, whose performance depends on formal, material and technical factors, represents a major challenge for the climatic adaptability and energy efficiency of this type of building. In this respect, it is assumed that the adoption of adequate constructive and formal measures related to the configuration of the façade components, with regard to their adaptation to the hot and dry region in Algeria, should allow for an improvement of the energy efficiency of the building as a whole. Based on this assumption, the present research was conducted to understand and evaluate the impact of the formal aspects and constructive components of the façade of an office building, and to examine to what extent the material choices would rationalize and unbind the formal architectural decisions in the perspective of a climatic adaptability and energy efficiency approach under the hot and arid climatic conditions of southern Algeria.

To this end, a bilateral energy assessment was carried out on the opaque and glazed surfaces of an energy model illustrating an existing building, selected as representative of office buildings in Biskra; this city being representative of the hot and arid conditions. After an extensive on-site conceptual and prospective analysis, the EnergyPlus engine was used to perform the energy simulation with Ladybug & Honeybee environmental plugins on the Grasshopper/Rhino parametric platform through a series of variations using an iterative brute

force approach. the energy performance of opaque walls was evaluated. The material-constructive aspect's impact was assessed based 23 variations in insulation thickness, considering light, medium and heavy wall scenarios and 4 solar absorption coefficients. The results showed that the thermal transmittance of the wall is the factor with the greatest impact in terms of operational energy, together with the solar absorption coefficient. Slight reductions due to thermal inertia can be reported and allow the medium-heavy solution to be designated as the best scenario. In addition, to ensure a balance between operational and embodied energy from a life cycle cost perspective, lower insulation levels are required. Subsequently, the formal aspect's impact was addressed by assessing the thermal energy saving potential of the implementation of varying horizontal overhangs and vertical fins as shading devices. The according results showed that the simultaneous use of these shading scenarios presents higher solar shading coefficients, and an adequate configuration implies energy savings for the considered cardinal and sub-cardinal orientations with different amplitudes.

In the second part of the study, the evaluation and optimization of the operational energy dedicated to cooling, heating and lighting was carried out considering: five types of window glass, five façade wall opening ratios (WWR), and assuming successively the absence and presence of a mobile shading system controlled to be adjusted on cardinal and sub-cardinal points. The results obtained show a significant correlation between energy consumption and high WWR values, which should be considered at their lower limit when designing façade openings. Moreover, shaded windows with low SHGC and U_g and high V_t should be adopted when dealing with the climatic conditions specific to the city of Biskra or a similar hot and dry context.

Finally, this study provides guidance for the climate and energy performance of office buildings, both new construction and renovation. In addition, it presents appropriate assessment and design tools that can be adapted to other types of buildings in order to find an optimal balance between user comfort, energy consumption and environmental impact.

Keywords: *building façade, energy efficiency, U-value, thermal inertia, glazing, solar shading, tertiary buildings, hot and dry climate*

دفعت الزيادة المقلقة في استهلاك الطاقة وانبعثات غازات الاحتباس الحراري السلطات العامة في الجزائر إلى اعتماد خطة كفاءة الطاقة لعام 2015 إلى أفق عام 2030، والتي يتم فيها فرض التقارب نحو كفاءة الطاقة في المباني. ومن المفارقات أن القطاع الثالث، الذي يعد ثاني أكبر مستهلك للطاقة، لا يؤخذ في الاعتبار بشكل كافٍ في النصوص التنظيمية. على الرغم من أن التوجيه يستهدف بشكل رئيسي العزل الحراري لغلاف المبنى من خلال تطبيق منهجية للحد من فقدان الحرارة في الحالة الثابتة، إلا أنه لا يعالج السلوك الانتقالي والمتغير لجدران الواجهة في هذه العملية، ولا الخصائص البعدية والفيزيائية للزجاج من خلال قوانين بناء كفاءة الطاقة الخاصة بالمناخ. قد يؤدي هذا الإهمال إلى المساس بأي تدابير لصالح التحكم في الطاقة لأن الغلاف وأدائه الحراري هما نقطة البداية لجعل المبنى موفرًا للطاقة. للواجهة، على وجه الخصوص، تأثير كبير لأنها تمثل مكانًا للتفاعل والتبادل بين الداخل والخارج.

وبالنظر إلى الاستهلاك المفرط للطاقة في المباني المكتبية، فإن الواجهة، التي يعتمد أداؤها على عوامل أساسية وتقنية، تمثل تحديًا رئيسيًا لقدرة هذا النوع من المباني على التكيف مع المناخ وكفاءة استخدام الطاقة. وعلى هذا النحو، يفترض أن اعتماد تدابير بناءة وشكلية ملائمة فيما يتعلق بتشكيل مكونات الواجهة، بخصوص تكيفها مع المنطقة الحارة والجافة في الجزائر، من شأنه أن يحسن كفاءة استخدام الطاقة في المبنى ككل. على أساس هذه الفرضية، تم إجراء هذا البحث من أجل فهم وتقييم تأثير الجوانب الشكلية والمكونات الهيكلية لواجهة مبنى المكاتب، ودراسة إلى أي مدى يمكن للخيارات المادية أن تبسط وتحرر قرارات التصميمات المعمارية الشكلية بغية اتباع نهج قابل للتكيف مع المناخ وكفاءة الطاقة في ظل الظروف المناخية الحارة والجافة في جنوب الجزائر.

وتحقيقًا لهذه الغاية، أُجري تقييم ثنائي للطاقة على الأسطح غير الشفافة والمساحات الزجاجية لنموذج للطاقة معايير لمبنى قائم، الذي تم اختياره كممثل لمباني المكاتب في بسكرة والتي تتميز بمناخ حار وجاف. بعد تحليل مفاهيمي ومستقبلي شامل تم إجراؤه في الموقع، تم استخدام محرك EnergyPlus لإجراء محاكاة للطاقة باستخدام ملحقات Ladybug & Honeybee البيئية على منصة Grasshopper/Rhino المحورية من خلال إجراء سلسلة من المحاكاة الرقمية بطريقة Brute force. وجرى تقييم أداء الجدران غير الشفافة في مجال الطاقة وتحليل أثر جانبها البنائي والمادي على أساس 23 سمك مختلف للعازل الحراري، مع مراعاة سيناريوهات الجدار الخفيف، ومتوسط الثقل والثقيل، و 4 معاملات امتصاص الطاقة الشمسية. أظهرت النتائج أن النقل الحراري للجدار هو العامل الأكثر تأثيرًا من حيث الطاقة التشغيلية، جنبًا إلى جنب مع معامل امتصاص الطاقة الشمسية. مع تخفيضات صغيرة بسبب العطالة الحرارية الناتجة عن استعمال جدار متوسط الثقل كأفضل سيناريو. علاوة على ذلك، يجب تحقيق توازن بين الطاقة التشغيلية والمتجسدة، وهناك حاجة إلى مستويات عزل أقل لاستهلاك الطاقة في دورة حياة المبنى ولضمان التوازن بين الطاقة التشغيلية والطاقة المتجسدة بهدف تكلفة استهلاك الطاقة خلال دورة حياة المبنى، هناك حاجة إلى مستويات عزل أقل. وبعد ذلك، تمت معالجة تأثير الجانب الشكلي من خلال تقييم إمكانات توفير الطاقة الحرارية من خلال الألواح الأفقية والعمودية المتغيرة

كأجهزة تظليل الشمس. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الاستخدام المتزامن لسيناريوهات التظليل من أشعة الشمس له معاملات حماية أعلى، وأن التكوين المناسب ينطوي على توفير الطاقة للتوجهات الأساسية والثانوية التي يتم أخذها في الاعتبار بساعات مختلفة.

وفي الجزء الثاني من الدراسة، جرى تقييم الطاقة التشغيلية المخصصة للتبريد والتدفئة والإضاءة واستخدامها على النحو الأمثل بالنظر إلى ما يلي: خمسة أنواع من زجاج النوافذ، وخمس نسب لفتح جدار الواجهة (WWR)، وبافتراض وجود نظام تظليل متحرك خاضع للرقابة يتم تعديله على النقاط الأساسية والثانوية. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها ارتباطًا مهمًا بين استهلاك الطاقة وقيم WWR العالية، والتي يجب أخذها في الاعتبار عند الحد الأدنى عند تصميم فتحات الواجهة. بالإضافة إلى ذلك، يجب اعتماد نوافذ مظلمة ذات مستوى منخفض من SHGC و U_g و V_t مرتفع عندما يتعلق الأمر بالظروف المناخية الخاصة بمدينة بسكرة أو سياق دافئ وجاف مماثل.

أخيرًا، تقدم هذه الدراسة إرشادات لأداء مباني المكاتب فيما يتعلق بالمناخ والطاقة، سواء كانت مباني جديدة أو قيد التجديد. وبالإضافة إلى ذلك، تقدم أدوات مناسبة للتقييم ودعم التصميم يمكن تكييفها مع أنواع أخرى من المباني من أجل إيجاد التوازن الأمثل بين راحة المستعملين واستهلاك الطاقة والآثار البيئية.

الكلمات المفتاحية: واجهة المبنى، كفاءة الطاقة، العزل الحراري، العطالة الحرارية، الزجاج، التظليل، بنايات القطاع الثالث، المناخ الحار والجاف.

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract	III
ملخص.....	V
Table des matières.....	VIII
Liste des figures.....	XV
Liste des tableaux.....	XX

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Fondement théorique et état des connaissances du sujet	1
2. Situation du problème et question de recherche	14
3. Hypothèse	18
4. Analyse conceptuelle	19
5. Contexte et objectif de recherche	20
6. Méthodologie	21
7. Structure de la thèse	23

PREMIERE PARTIE

CADRE THEORIQUE ET CONCEPTUEL

CHAPITRE I : Efficacité énergétique, législations et stratégies conceptuelles dans les bâtiments de bureaux

I.1. Introduction	27
I.2. Définition	28
I.3. Avantages de l'efficacité énergétique	28
I.4. Evaluation de l'efficacité énergétique du bâtiment	29
I.4.1. Méthodes de certification	29
I.5. Formes de consommation énergétique dans le bâtiment	30
I.5.1. Energie intrinsèque	31

I.5.2. Energie induite	31
I.5.3. Energie opérationnelle	31
I.6. Stratégies de conception énergétique	32
I.6.1. Stratégies de conception passive	32
I.6.1.1. La forme	32
I.6.1.2. L'orientation	32
I.6.1.3. L'inertie thermique	32
I.6.1.4. la ventilation naturelle.....	32
I.6.1.5. Le refroidissement par évaporation	33
I.6.1.6. L'isolation thermique.....	33
I.6.1.7. Les fenêtres	34
I.6.1.8. La protection solaire	34
I.6.1.9. L'étanchéité à l'air	34
I.6.1.10. Le solaire passif	35
I.6.2. Stratégies de conception active	35
I.6.2.1. Systèmes HVAC	36
I.6.2.2. Energie électrique solaire	36
I.6.2.3. Energie thermique solaire	36
I.6.2.4. Energie éolienne	36
I.7. Bâtiments publics et paramètres d'efficacité énergétique	36
I.7.1. Utilisation de l'énergie dans les bâtiments de bureaux	36
I.7.2. Paramètres affectant l'efficacité énergétique	37
I.7.2.1. Les systèmes de chauffage, ventilation et de conditionnement d'air (HVAC)	37
I.7.2.2. L'éclairage	37
I.7.2.3. Les équipements de bureau	37
I.7.2.4. Le comportement des occupants	38
I.7.2.5. La situation et la configuration du bâtiment	38
I.7.3. Situation de la consommation énergétique des bâtiments de bureaux en	38
Algérie	
I.7.3.1. Consommation énergétique primaire en Algérie	38
I.7.3.2. Emissions CO2	45
I.7.4. Politiques et stratégies visant à mesurer le comportement énergétique des	46
bâtiments en Algérie.....	

I.8. Conclusion	48
CHAPITRE II : Forme et matérialité pour des façades performantes sous climats chauds et arides	
II.1. Introduction	49
II.2. Adaptabilité du bâtiment au contexte chaud et aride	50
II.2.1. Adaptation des bâtiments au changement climatique	50
II.3. Le climat	50
II.3.1. Les zones climatiques	51
II.3.2. Le climat chaud et aride	51
II.3.3. Caractéristiques d'un climat chaud et aride	52
II.3.3.1. Faibles précipitations	52
II.3.3.2. Températures extrêmes	53
II.3.3.3. Le vent	53
II.3.4. Indice d'aridité et localisation des climats chauds et arides	53
II.3.4.1. L'indice d'aridité	53
II.4. Le climat en Algérie	54
II.4.1. Classification des zones climatiques en Algérie	55
II.4.1.1. Zones climatiques d'hiver	55
II.4.1.2. Zones climatiques d'été	55
II.5. Conception dans les zones chaudes et arides : Principes de base	57
II.5.1. Formes urbaines et espaces extérieurs	57
II.5.2. Orientation	58
II.5.3. Forme et volume	58
II.5.4. Murs et matériaux	58
II.5.5. Ouvertures et fenêtres	59
II.5.6. Dispositifs d'ombrage	60
II.5.7. Couleurs	60
II.6. Architecture bioclimatique et efficacité énergétique	60
II.7. La façade entre forme et matérialité	61
II.7.1. Définition de la façade	62
II.7.2. Rôle de la façade	62
II.7.3. Classification des façades	62

II.7.3.1. Selon la géométrie	62
II.7.3.2. Selon la portance	64
II.7.3.3. Selon le matériau	64
II.8. Conclusion	69

CHAPITRE III : Comportement thermiques et performances énergétique des composants de la façade

III.1. Introduction	70
III.2. Principes d'échanges thermiques de la façade	70
III.2.1. Modes de transfert thermique dans le bâtiment	70
III.2.2. Processus de transfert thermique dans le bâtiment.....	71
III.3. Propriétés thermo-physiques des matériaux	72
III.3.1. Transfert thermique dans le bâtiment	72
III.3.1.1. Transfert thermique en régime permanent	72
III.3.1.2. Transfert thermique en régime transitoire	73
III.4. Paramètres thermiques de surfaces opaques de la façade	74
III.4.1. Capacité thermique	74
III.4.2. Diffusivité thermique	74
III.4.3. Effusivité thermique	74
III.4.4. Inertie thermique	74
III.4.4.1. Influence de l'inertie thermique sur le choix des matériaux.....	75
III.4.4.2. Mesure de l'inertie thermique	75
III.5. Isolation thermique	77
III.5.1. Concept d'isolation thermique	77
III.5.2. Avantages de l'isolation thermique	77
III.5.3. Propriétés thermiques des matériaux d'isolation	77
III.5.4. Les principaux isolants thermiques	77
III.5.5. Position des isolants thermiques	78
III.6. Fenêtres et vitrage	79
III.6.1. Types de vitrage	79
III.6.2. Performances thermique des vitrages	80
III.6.2.1. Conductivité thermique (valeur U)	80
III.6.2.2. Coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)	80

III.6.2.3. La transmission de lumière visible (VT)	80
III.6.2.4. Rapport (LSG) entre le gain de chaleur solaire et le facteur de transmission visible.....	80
III.6.3. Impact des caractéristiques des fenêtres sur la performance énergétique	82
III.6.4. Rapport fenêtre-mur (WWR)	82
III.7. Ombrage et protection solaire	83
III.7.1. Dispositif de protection solaire extérieure	83
III.7.2. Types généraux de dispositifs de protection solaire extérieure	84
III.7.3. Protection solaire intérieure	85
III.7.4. Contrôle des dispositifs d'ombrage et critères d'évaluation des performances	85
III.7.5. Impact des protection solaires sur le rendement énergétique	85
III.8. Conclusion	86

DEUXIEME PARTIE

CADRE METHODOLOGIQUE – ANALYSE ET OPTIMISATION

CHAPITRE IV : Contexte de l'étude, choix du bâtiment de référence et présentation de la méthodologie d'analyse

IV.4. Introduction	87
PARTIE 01 : Contexte d'étude : La ville de Biskra, définition, climat local et protocole analytique des bâtiments de bureau	88
IV.2. Contexte d'étude : La ville de Biskra	88
IV.2.1. Présentation	88
IV.2.2. Aperçu des caractéristiques climatique de Biskra	88
IV.2.2.1. Température de l'air	89
IV.2.2.2. Humidité relative	91
IV.2.2.3. Ensoleillement	91
IV.2.2.4. Vent	91
IV.2.2.5. Précipitation et aridité	92
IV.2.3. Analyse bioclimatique	92
IV.3. Bâtiment de bureaux à Biskra, une analyse prospective en vue de définir un cas d'étude représentatif.....	94
IV.3.1. Présentation de l'objet d'étude.....	94

IV.3.2. Aperçu général sur les bâtiments de bureaux à Biskra	95
IV.3.3. Protocole d'analyse.....	96
IV.3.3.1 Définition de l'échantillon à étudier.....	97
IV.3.3.2. Critères d'analyse.....	97
IV.3.3.3. Synthèse d'analyse : Définition du cas d'étude.....	101
IV.3.3.4. Sélection du cas d'étude représentatif.....	104
PARTIE 02 : Mise en place du cadre de la méthodologie expérimentale	105
IV.4. La simulation paramétrique.....	106
IV.5. Bâtiment cas d'étude : « Algérienne des eaux ».....	109
IV.5.1. Description	109
IV.5.2. Elaboration, calibration et validation du modèle énergétique	110
IV.5.2.1. Méthodologie	110
IV.5.2.2. Collecte des données	112
IV.5.2.2.1. Données météorologiques personnalisées	112
IV.5.2.2.2. Propriétés des zones thermiques et paramètres de fonctionnement	113
IV.5.2.2.3. Modèle théorique COP/EER du système HVAC	114
IV.5.2.2.4 Validation	116
IV.6. Conclusion	116
CHAPITRE V : Impact des propriétés des surfaces vitrées et du système d'ombrage sur l'efficacité énergétique	
V.1. Introduction	119
V.2. Elaboration du protocole expérimental.....	120
V.3. Paramètres de simulation	123
V.3.1. Configuration du modèle énergétique	124
V.3.2. Paramètres inputs des composants de la fenêtre	124
V.3.2.1. Types de fenêtres	124
V.3.2.2. Rapport fenêtre-mur (WWR)	125
V.3.2.3. Orientation	125
V.3.2.4. Système de protection solaire	125
V.4. Résultats et discussion	127
V.4.1. Evaluation du seuil d'actionnement optimal	130

V.4.1.1. Orientation du cas d'étude	130
V.4.1.2. Points cardinaux et semi-cardinaux	134
V.4.2. Impact du type de fenêtre et du rapport WWR	138
V.4.2.1. Cas d'étude	139
V.4.2.2. Points cardinaux et semi-cardinaux	141
V.4.3. Impact des stores extérieurs mobiles	146
V.4.3.1. Cas d'étude	146
V.4.3.2. Points cardinaux et semi-cardinaux.....	148
V.4.4. Potentiel d'économie d'énergie de la solution du dispositif d'ombrage	153
V.4.4.1. Points cardinaux et semi-cardinaux	155
V.5. Conclusion	161

CHAPITRES VI : Impact des paramètres des surfaces opaques sur l'efficacité énergétique du bâtiment

VI.1. Introduction	163
PARTIE 01 : Impact des paramètres thermo-physiques et dynamiques du mur extérieur, et du coefficient d'absorption solaire.	164
VI.2. Elaboration du protocole expérimental.....	164
VI.2.1. Définition du "Modèle de conception".....	168
VI.2.1.1. Charges de zone	170
VI.2.1.2. Configuration des murs extérieurs	171
VI.3. Résultats et discussion	175
VI.3.1. Impact du coefficient d'absorption solaire sur la performance énergétique du bâtiment : vers la définition du scénario optimal	180
VI.3.2. Impact de l'inertie thermique du mur extérieur et de l'épaisseur de l'isolation sur la consommation d'énergie du bâtiment (phase d'exploitation)	182
VI.3.3. Impact de l'inertie thermique du mur extérieur et de l'épaisseur de l'isolation sur la consommation d'énergie primaire	185
PARTIE 02 : Évaluation de l'effet de la protection solaire sur la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment en atténuant les radiations solaires incidentes sur les surfaces opaques.	188

VI.4. Effet de la protection solaire sur la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment	188
VI.5. Elaboration du protocole d'analyse.....	189
VI.6. Résultats	192
VI.6.1. Discussion des résultats	201
VI.6.2. Résumé des solutions optimales, vers une analyse comparative des solutions optimales d'ombrage	207
VI.4. Conclusion	208
 CONCLUSION GENERALE	
Principaux résultats et synthèse	211
Recommandations	218
Recommandations pour les surfaces vitrées	218
Recommandations pour les surfaces opaques (murs de façades)	219
Limites de la recherche	220
Perspectives de recherche	222
 BIBLIOGRAPHIE	 223
ANNEXES	237

Liste des figures

Figure 1	Organigramme du processus d'analyse conceptuelle	19
Figure I.1	Formes de consommation énergétique.....	31
Figure I.2	Protection solaire des fenêtres.....	34
Figure I.3	Gains solaires directs.....	44
Figure I.4	Répartition de la consommation du secteur de l'énergie par activité...	40
Figure I.5	Répartition de la consommation du secteur de l'énergie par produit	40
Figure I.6	Répartition de la consommation finale par forme d'énergie.....	42
Figure I.7	Répartition de la consommation finale par secteur d'activité.....	42
Figure I.8	Evolution de la consommation d'énergie en Algérie.....	43
Figure I.9	Répartition de la consommation du secteur tertiaire par type d'énergie...	44
Figure I.10	Répartition de la consommation du secteur tertiaire par branche.....	44
Figure I.11	Emissions de CO2 par secteur (en Mt CO2), Algérie 2009-2019.....	45
Figure I.12	Emissions de CO2 de la production d'électricité et de chaleur par source d'énergie pour l'année 2019 (en Mt CO2).....	46
Figure II.1	Zones climatiques mondiales	51
Figure II.2.	Carte mondiale des zones arides	52
Figure II.3	Carte des climats de l'Algérie selon la classification de Köppen.....	54
Figure II.4	Carte des zones climatiques d'hiver.....	56
Figure II.5	Carte des zones climatiques d'été.....	57
Figure II.6	Modèles urbains traditionnels	58
Figure II.7	Orientation optimale (a) concernant les gains de chaleur - nord et sud ; (b) concernant la ventilation - face au vent	58
Figure II.8	Emplacement de l'isolant	59
Figure II.9	Placement des ouvertures	59
Figure II.10	Dispositifs de protection solaire	60
Figure II.11	Tryptique de l'architecture bioclimatique.....	61
Figure II.12	Façade verticale droite.....	63
Figure II.13	Façade inclinée.....	63
Figure II.14	Façade courbée.....	63
Figure II.15	Façade mixte.....	64
Figure II.16	Façade lourde en béton.....	65
Figure II.17	Façade en béton préfabriqué.....	65

Liste des figures

Figure II.18	Façade en brique (a) brique en terre cuite ; b) brique en béton.....	66
Figure II.19	Façade à panneaux métalliques.....	66
Figure II.20	Façade en mur rideau.....	67
Figure II.21	Façade vitrée.....	67
Figure II.22	Façade ventilée.....	68
Figure II.23	Façade respirante.....	68
Figure II.24	Façade végétalisée.....	68
Figure III.1	Mécanisme de transfert de chaleur dans un bâtiment.....	71
Figure III.2	Evolution du profil de température dans une paroi suite à un changement de la température d'une surface.....	73
Figure III.3	Température interne d'un bâtiment à haute et à basse inertie thermique comparée à la température externe.....	75
Figure III.4	Réponse thermique à la propagation d'une onde de chaleur sinusoïdale à travers une paroi.....	76
Figure III.5	Classification des matériaux d'isolation.....	78
Figure III.6	Procédés d'isolation thermique des murs extérieurs.....	78
Figure III.7	Types de vitrages : (a) simple vitrage ; (b) double vitrage ; (c) triple vitrage	80
Figure III.8	Caractéristiques d'une fenêtre typique à double vitrage avec un faible SHGC, un verre à faible émissivité, rempli de gaz argon	82
Figure III.9	L'approche de conception à trois niveaux pour un confort thermique en été	83
Figure III.10	Types généraux de protections solaires extérieures.....	84
Figure III.11	Dispositif d'ombrage intérieur pour le contrôle solaire.....	85
Figure IV.1	Localisation géographique et climatologique de la ville de Biskra en Algérie	89
Figure IV.2	Graphique des températures extérieures moyennes annuelles	90
Figure IV.3	Graphique de la température extérieure quotidienne	90
Figure IV.4	Graphique de l'humidité relative	91
Figure IV.5	Rayonnement solaire global annuel	91
Figure IV.6	Rose des vents de Biskra	92
Figure IV.7	Diagramme psychométrique de la ville de Biskra	94
Figure IV.8	Localisation des bâtiments de bureaux choisis pour l'échantillon d'analyse	97
Figure IV.9	Stratification des murs observés dans les échantillons de bâtiments de bureau analysés	100
	Cas d'étude (a) Bâtiment "Algérienne des Eaux", (b) Plan d'étage type ...	

Liste des figures

Figure IV.10	Organigramme de la méthodologie d'évaluation expérimentale	105
	Vue 3D du modèle de bâtiment	
Figure IV.11	Hierarchisation du processus de simulation énergétique avec les plugins environnementaux ladybug&honeybee dans l'outil paramétrique de Grasshopper	108
Figure IV.12	Cas d'étude (a) Bâtiment "Algérienne des Eaux", (b) Plan d'étage type	109
Figure IV.13	Vue 3D du modèle du bâtiment	111
Figure IV.14	Définition des programmes de zones thermiques	114
Figure IV.15	Équipement, charges d'éclairage et programme quotidien d'occupation	114
Figure IV.16	Modèle théorique des attributs variables du COP et de l'EER des systèmes de climatisation split	115
Figure IV.17	Consommation énergétique totale mesurée et simulée pour le modèle de bâtiment calibré	116
Figure V.1	Impact des composants physiques et des systèmes d'ombrage sur la consommation énergétique	121
Figure V.2	Dimensions et configuration du modèle <i>Test-cell</i>	123
Figure V.3	Ratios d'ouverture (WWR) considérés pour la façade de la cellule test	125
Figure V.4	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Nord-Est	130
Figure V.5	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Sud-Est	131
Figure V.6	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Sud-Ouest	131
Figure V.7	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Nord-Ouest	132
Figure V.8	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Nord	134
Figure V.9	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Nord-Est	134
Figure V.10	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Est	135
Figure V.11	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Sud-Est	135
Figure V.12	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Sud	136
Figure V.13	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Sud-Ouest	136

Liste des figures

Figure V.14	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Ouest	137
Figure V.15	Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre Nord-Ouest	137
Figure V.16	Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations des façades du cas d'étude	140
Figure V.17	Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations vers les points cardinaux et secondaires	144
Figure V.18	Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en présence de système d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations de façades du cas d'étude	147
Figure V.19	Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en présence de système d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations vers les points cardinaux et secondaires	151
Figure V.20	Diagramme comparatif entre la consommation énergétique dans le cas de présence et d'absence des systèmes d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations de façades du cas d'étude	154
Figure V.21	Diagramme comparatif entre la consommation énergétique dans le cas de présence et d'absence des systèmes d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations vers les points cardinaux	158
Figure VI.1	(a) Aperçu 3D du modèle de conception (b) Définition du programme des zones thermiques A1, A2, A3	168
Figure VI.2	Équipement, charges d'éclairage et programme quotidien d'occupation...	170
Figure VI.3	Stratification du mur extérieur, *e représente l'épaisseur variable de l'isolation en polystyrène expansé	172
Figure VI.4	Consommation annuelle d'énergie électrique en termes de chauffage et de refroidissement en fonction de l'épaisseur de l'isolation et du coefficient d'absorption solaire pour les 3 configurations de murs ("S1", "S2" et "S3")	178

Liste des figures

Figure VI.5	Consommation annuelle d'énergie électrique en termes de refroidissement et de chauffage en fonction du coefficient d'absorption solaire	181
Figure VI.6	Consommation d'énergie primaire du bâtiment pour les trois variantes de murs "S1", "S2" et "S3".	187
Figure VI.7	Aperçu du résultat graphique de l'analyse de l'irradiation solaire sous Ladybug sur l'interface de Rhinoceros/Grasshopper	191
Figure VI.8	Potentiel d'économie d'énergie pour les solutions d'ombrage Horizontales et Verticales et leurs SCh et SCv relatifs en fonction de la longueur des lamelles pour les orientations du cas d'étude.	196
Figure VI.9	Potentiel d'économie d'énergie pour la solution d'ombrage mixte en fonction du Shading Coefficient SCm pour les orientations du cas d'étude	198
Figure VI.10	Potentiel d'économie d'énergie pour les solutions d'ombrage Horizontales et Verticales et leurs SCh et SCv relatifs en fonction de la longueur des lamelles pour les orientations considérées (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO)	201
Figure VI.11	Potentiel d'économie d'énergie pour la solution d'ombrage mixte en fonction du Shading Coefficient SCm pour les orientations considérées (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO)	204
Figure VI.12	Potentiel d'économie d'énergie selon les solutions d'ombrage optimale horizontales, verticales et mixtes pour les orientations considérées (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO)	211

Liste des tableaux

Tableau I.1	Production nationale d'énergie primaire.....	39
Tableau II.1	Classification climatique selon l'indice d'aridité de De Martonne	54
Tableau III.1	Valeurs typiques de SHGC, VT et LGS pour différents types de vitrage ...	82
Tableau IV.1	Critères d'analyse typologique adoptés pour les performances des bâtiments et les éléments de façade.....	98
	Paramètres thermo-physiques et d'exploitation du modèle énergétique du bâtiment	
Tableau IV.2	Analyse typologique de l'échantillon de 10 bâtiments de bureaux sélectionnés dans la ville de Biskra	99
Tableau IV.3	Paramètres thermo-physiques et d'exploitation du modèle énergétique du bâtiment	112
Tableau IV.4	Propriétés thermo-physiques des composants de l'enveloppe du bâtiment	113
Tableau V.1	Paramètres thermo-physiques et conditions limites du modèle énergétique	124
Tableau V.2	Propriétés thermiques et optiques des systèmes de fenêtres considérées	124
Tableau V.3	Propriétés des stores vénitiens extérieurs	127
Tableau V.4	Seuil d'activation du système d'ombrage dynamique en fonction du rayonnement solaire incident (W/m^2) pour le cas d'étude	133
Tableau V.5	Seuil d'activation du système d'ombrage dynamique en fonction du rayonnement solaire incident (W/m^2) pour les points cardinaux et secondaires	138
Tableau V.6	Potentiel d'économie d'énergie du système de protection solaire extérieure.	160
Tableau VI.1	Paramètres thermo-physiques et de fonctionnement du modèle énergétique du bâtiment	169
Tableau VI.2	Propriétés thermo-physiques des composants de l'enveloppe du bâtiment	172
Tableau VI.3	Variations du mur extérieur en fonction de l'épaisseur de l'isolant, des propriétés thermo-physiques et dynamiques.	173

Chapitre Introductif

CHAPITRE I Introductif

1. Fondement théorique et état des connaissances du sujet

Ces dernières décennies, la consommation mondiale d'énergie dans les bâtiments a régulièrement augmenté avec un taux annuel estimé à 1,1 % en l'an 2000, entraînant une augmentation conséquente des émissions mondiales des gaz à effet de serre (GES) lesquels sont l'un des principaux facteurs à l'origine du réchauffement climatique. Pour rappel les GES qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations au sein de l'atmosphère terrestre ont vu leur concentration augmenter du fait, notamment, des activités humaines. Ainsi, des gaz comme le dioxyde de carbone (CO₂) générés directement à partir de la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon) et indirectement du fait de la consommation d'électricité des bâtiments, vont augmenter régulièrement de 25 % (Levine et al., 2007). De ce point de vue, le bâtiment est l'un des secteurs clés dans lequel il est possible d'intervenir pour effectuer des changements rapides et durables en termes d'économie d'énergie. En effet, selon des statistiques récentes, ce secteur représente 38 % de la consommation énergétique mondiale, alors que les émissions de CO₂ qu'il produit ont atteint un pic d'environ 10 GtCO₂ de 2018 à 2019, soit 28% des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie (Global Alliance, 2020).

Ces effets ont été ralentis en raison des impacts de la pandémie du COVID-19, où les activités mondiales de l'industrie et de la construction ont chuté de 10 à 25% à partir de 2020. Cependant, la fin de la pandémie a entraîné une reprise économique extrêmement rapide de l'ordre de 5,1% qui s'est traduite par un rebondissement tout aussi important de la demande énergétique avec une hausse estimée à 6% dans la consommation des combustibles fossiles. Pour contrecarrer cette situation, des mesures en faveur de la maîtrise de l'énergie et des actions d'envergure ont été initiées comme moyen d'atteindre la neutralité climatique en plus des politiques et réglementations précédemment appliquées visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments (AIE, 2019).

En général, cette dernière notion vise à assurer le confort des occupants avec un besoin énergétique minimal du système HVAC, en réduisant principalement la quantité d'énergie utilisée pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage (Chegut et al., 2019). Ainsi, l'efficacité énergétique est un concept fréquemment utilisé relativement aux bâtiments en vue de réduire tant leur consommation d'énergie que les émissions de GES résultantes, et ce durant toute la durée de leur utilisation. Pour ce faire, l'objectif de l'efficacité énergétique du bâtiment doit être considéré dès les premières étapes de la conception, où la mise en œuvre de stratégies de conception est plus efficace (meetMed, 2020). Cependant, ces dernières années de plus en plus de travaux dits de « rénovation énergétique » ont été effectués sur des bâtiments historiques ou ceux considérés comme obsolètes et ne correspondant plus aux normes et réglementations thermiques en vigueur telle qu'instituées dans beaucoup de pays. À noter tout de même que ce type d'intervention sur des bâtiments existants présente des défis méthodologiques et techniques majeurs (Shaik et al., 2017).

En général, la fusion de technologies efficaces dans les enveloppes existantes représente des perspectives substantielles de réduction des impacts énergétiques, environnementaux et économiques induits dans le secteur du bâtiment (Xing et al., 2011). De plus, la réalisation des objectifs de l'efficacité énergétique dans les bâtiments nouveaux repose sur la mise en œuvre de normes précises et de codes énergétiques rigoureux touchant tous les composants matériels de l'enveloppe. Cependant, leur application représente un défi pour de nombreux gouvernements nationaux en raison de la complexité, de l'utilisation variée et de la structure d'âge de l'environnement bâti, ainsi que de la diversité des matériaux et des pratiques de construction locales (Global Status, 2021).

Si à l'échelle mondiale la consommation énergétique du bâtiment suscite beaucoup d'intérêt, la situation est encore plus critique pour les pays émergents. Ainsi, ces dernières années, la croissance démographique doublée d'une urbanisation rapide et leurs corollaires en termes de consommation d'énergie et émissions de GES, ont poussé l'Algérie à établir des cadres juridiques visant la mise en œuvre de codes de construction en vue d'atteindre l'efficacité énergétique des bâtiments. Les mesures en faveur de la qualité environnementale étant déjà institutionnalisées dans plusieurs pays, sous forme de normes (standards, labels), réglementations et incitations financières, l'Algérie tente ainsi de s'aligner sur les objectifs mondiaux en matière d'environnement et d'énergie en adoptant des plans d'action d'efficacité énergétique. Il faut dire que le secteur du bâtiment en Algérie a atteint des chiffres alarmants puisqu'il est responsable de 15% des émissions totales de CO₂, et enregistre plus de 43% de la consommation énergétique totale du pays (APRUE, 2019). De plus, 30% de ces dépenses énergétiques sont dédiées aux bâtiments non résidentiels, lesquels ont enregistré un taux de croissance de 2,9% entre 2018 et 2019 (Bilan National, M.E.M, 2019). Fortement dépendante des combustibles fossiles, cette augmentation devrait se poursuivre en raison, à la fois, de l'utilisation abondante du chauffage et de la climatisation dans des bâtiments dépourvus de mesures d'efficacité énergétique, mais aussi, à cause des subventions appliquées par le pays sur les prix de l'énergie pour les citoyens, sachant que les prix de l'eau, du gaz naturel et de l'électricité sont gelés depuis 2005 (Kherfah et al., 2020).

Prenant conscience de la gravité de la situation, des actions réelles furent entreprises notamment par « l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) » qui a ciblé le secteur du bâtiment en adoptant un « Plan d'Efficacité Energétique » 2015 à l'horizon 2030. Afin de réduire la consommation d'énergie primaire de 9% et les émissions de gaz à effet de serre qui y sont liées l'APRUE mise sur le recours à des équipements et des technologies performants (APRUE, 2019). Ainsi, ce programme initié par l'APRUE fut précédé d'une campagne de sensibilisation sur la réduction de la consommation d'énergie dans les périodes d'hiver et d'été et en même temps pour promouvoir des projets d'efficacité énergétique pour le grand public. Parmi les actions entreprises, il faut signaler l'utilisation obligatoire de l'isolation thermique pour les nouvelles constructions et les mesures de rénovation en mettant l'accent sur le résidentiel avec des directives rares pour les bâtiments non résidentiels basés sur les réglementations thermiques nationales des bâtiments (DTR. C 3-2, DTR. C3-4). De ce fait, une réglementation thermique nationale a été initiée en 1995 et mise

à jour en 2016 par la plateforme RETA (CDER) visant à améliorer la performance énergétique du bâtiment de 30 à 40 % (Bilan M.E.M, 2011-2015) par le calcul des pertes de chaleur en hiver et des gains de chaleur en été. Cependant, les codes prescriptifs concernant les exigences de l'enveloppe du bâtiment ne sont toujours pas appliqués.

L'enveloppe et sa performance thermiques représentent le point de départ pour rendre un bâtiment énergétiquement efficace. La façade, en particulier, a un impact significatif puisqu'elle représente un lieu d'interaction et d'échange entre l'intérieur et l'extérieur. En effet, mis à part les composants du toit et le type de fondation, les niveaux d'isolation, le type et la taille des fenêtres, la masse thermique et la protection solaire sont tous des facteurs qui influencent l'efficacité énergétique du bâtiment et déterminent les conditions thermiques et visuelles à l'intérieur d'un bâtiment (Lakhdari, 2021). Etant des murs extérieurs, les façades représentent la barrière physique qui module l'intérieur du bâtiment en répondant activement à l'environnement extérieur (Sandak et al., 2019 ; Aksamija, 2013). En plus de son rôle dans la matérialisation de l'image du bâtiment et son expression architecturale, des paramètres techniques et fonctionnels doivent être remplis par la façade, tels que supporter son poids propre, offrir des vues sur l'extérieur et permettre la lumière du jour, tout en résistant aux charges du vent, en protégeant les occupants du bruit extérieur, en s'opposant aux apports solaires indésirables, et en modulant les températures extrêmes (Aksamija, 2009). En outre, comme elle représente souvent la zone la plus exposée de l'enveloppe, on attribue à la façade un rôle central dans la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment, quoique sa performance soit en corrélation avec les caractéristiques prédéfinies de ses composants intégrés notamment leurs aspects formels et constructifs. De ce point de vue, la complexité des technologies appliquées au niveau de la façade se développe progressivement afin de maintenir un niveau approprié de confort thermique, visuel et acoustique, favorisant ainsi la santé et la productivité des occupants du bâtiment (Aksamija, 2013).

Selon Aksamija (2013), la conception de façades à haute performance nécessite des considérations spécifiques au climat, et des stratégies actives et passives spécifiques doivent être envisagées en fonction de chaque emplacement. Ses composants opaques, vitrés et intégrés doivent remplir une fonction de réponse adéquate aux changements de l'utilisation intermittente ou continue de l'espace intérieur, et s'adapter aux paramètres environnementaux physiques immédiats, afin de contribuer au confort thermique du bâtiment et d'atteindre son efficacité énergétique (Loonen et al., 2015). De telles considérations sont sans doute complexes dans leur

application, car non seulement la localisation joue un rôle central dans la détermination des stratégies de base à appliquer, mais celles-ci doivent également s'adapter à des conditions limites en constante évolution en raison de la variabilité des conditions au fil des saisons (Loonen et al., 2013).

Parmi les facteurs qui affectent le comportement thermique et visuel de la façade, les fluctuations de température et le rayonnement solaire sont les plus pertinents (Aelenei et al., 2016). En effet, les radiations solaires sont parmi les quelques facteurs climatiques qui affectent simultanément le confort thermique et visuel, et peuvent augmenter en amplitude selon le climat (Ulpiani et al., 2017). Pour le cas des régions chaudes et sèches, les fluctuations saisonnières du climat peuvent être importantes, et leurs effets encore plus prononcés. Dans ce type de climat, il est important que la conception de la façade réponde à des considérations strictes pour éviter les gains de chaleur solaire, notamment, en améliorant l'isolation par des méthodes d'auto-ombrage et des dispositifs d'ombrage qui aident à admettre la lumière réfléchie (Aksamija, 2015).

L'optimisation des composants de la façade a été au centre de l'amélioration de l'efficacité des bâtiments, et a fait l'objet d'applications par le biais de plusieurs méthodes prenant également en compte l'implication des impacts économiques et environnementaux, toujours en développement sous l'intérêt minutieux des chercheurs. De multiples études ont évalué les composants opaques de la façade à travers leurs propriétés thermo-physiques et dynamiques (épaisseur, densité, conduction, capacité thermique, réflectivité). Les composants vitrés ont également été étudiés en ce qui concerne leurs dimensions, leurs paramètres thermiques et optiques (WWR, épaisseur, nombre de couches, transmission de chaleur, absorption de lumière, réflexion). De même que les dispositifs de contrôle solaire ont été analysés selon la forme du bâtiment et les climats spécifiques de fonctionnement (Aksamija, 2015). Une littérature abondante existe sur le sujet où les chercheurs ont abordé l'évaluation de la façade du point de vue de son comportement thermique, visuel par rapport à sa performance énergétique. Les résultats de ces études ont permis de définir des orientations et des lignes directrices de conception ainsi que le développement de technologies adaptées à différents contextes.

On attribue aux parois opaques la capacité d'empêcher, de moduler et de collecter les apports solaires et les gains de chaleur internes, ce qui est essentiel pour atteindre un équilibre

approprié entre confort thermique et faible consommation d'énergie. La transmittance thermique pour sa part reflète la capacité de la paroi à acheminer le flux de chaleur à travers ses composants, et représente le principal paramètre d'optimisation pour atteindre l'efficacité énergétique. Lié aux phénomènes de conduction, le niveau d'inertie thermique, obtenu par une stratification spécifique de la paroi, module par son comportement transitoire la capacité de la paroi à atténuer les fluctuations journalières de température en fonction de l'évolution constante des conditions limites entre les deux côtés de la paroi. De plus, la géométrie, la texture et la couleur de la paroi opaque de la façade jouent un rôle majeur dans la définition de ses propriétés d'auto-ombrage (*self-shading*) en tant que stratégie passive pour annuler les effets négatifs du rayonnement solaire.

La transmission thermique des parois opaques est souvent abordée en tenant compte de la stratification du mur et de l'utilisation spécifique de l'isolation thermique. Il s'agit d'un paramètre clé pour limiter les pertes de chaleur et, par conséquent, pour augmenter l'efficacité des enveloppes des bâtiments en réduisant les besoins de chauffage jusqu'à 70 % (Rivoire et al., 2018). Néanmoins, des approches simplistes peuvent conduire à des aberrations, telles que "plus l'isolation est importante, mieux c'est", mais ce n'est pas toujours le cas. Il est donc nécessaire de définir le seuil d'épaisseur pour assurer un équilibre entre les besoins de refroidissement et de chauffage (Ounis et al., 2022). Selon cette approche, diverses études ont abordé l'optimisation de l'épaisseur de l'isolation du mur extérieur en prenant en considération l'économie d'énergie, et l'aspect économique pendant la phase opérationnelle du bâtiment (Kumar et al., 2020). Étant une dimension importante de l'optimisation, l'aspect énergétique opérationnel du bâtiment est évalué au moyen de deux méthodes de calcul de la charge de transmission : i) la méthode la plus simple qui tourne autour d'un processus en régime permanent en fonction des degrés-temps, et ii) une méthode plus précise qui calcule le modèle de transfert de chaleur dynamique du bâtiment en tenant compte de la morphologie du bâtiment, de son comportement transitoire et des paramètres de fonctionnement.

A côté des méthodes précédentes, il existe d'autres approches qui utilisent l'optimisation en vue d'obtenir des retombées financières estimées en fonction de la performance du bâtiment durant la durée de son exploitation. Dans le sillage de ces méthodes, l'analyse du coût du cycle de vie (ACV) est la plus couramment utilisée. Il s'agit d'une approche qui prend en compte les économies d'énergie nettes réalisées grâce à l'isolation pendant toute la durée de vie d'un bâtiment. En outre, la nouvelle méthode d'optimisation des coûts, introduite

dans la directive européenne 2010/31/EU (GACD Regulation, 2010) et décrite dans les lignes directrices de la Commission européenne 2012/C115/01, a été adoptée dans quelques études réalisées pour définir l'épaisseur d'isolation rentable du mur extérieur (D'agostino et al., 2019).

L'efficacité de la couche d'isolation est également liée à l'inertie thermique du mur puisqu'elle "correspond à la réponse dynamique du mur ou de l'enveloppe à une contrainte climatique", qu'elle va déphaser et amortir (Claude et al., 2020). L'inertie thermique affecte la manière dont un bâtiment réagit aux changements des conditions externes et internes, influençant ses modèles de charge thermique réels notamment la charge sensible pour le chauffage et le refroidissement (Aste, et al., 2012). De plus, l'impact de l'inertie semble être plus important dans les environnements chauds que dans les climats plus froids et dépend essentiellement de l'amplitude de la température journalière.

En ce qui concerne l'impact de la masse thermique sur les besoins en énergie de refroidissement, certaines différences existent dans la littérature, étant donné que certaines études suggèrent que dans les climats chauds, la demande en énergie de refroidissement peut augmenter en raison d'une inertie thermique accrue. Alors qu'en situation transitoire, l'inertie thermique d'un bâtiment peut absorber, stocker et libérer progressivement de la chaleur en fonction de la différence de température avec l'environnement immédiat (Verbeke et al., 2019). En général, la chaleur stockée dépend de la densité et de la capacité thermique spécifique du matériau, tandis que le taux d'échange de chaleur est influencé par la conductivité thermique du matériau. Ainsi, les bâtiments ayant une grande inertie thermique dans l'enveloppe, présenteront une réaction réduite et retardée à une augmentation soudaine de la température ambiante externe.

Plusieurs auteurs, comme Gregory et al. (2008), ainsi que Bojic et al. (2001) ont évalué l'influence des propriétés thermiques des murs sur la performance énergétique du bâtiment, en comparant différents systèmes de construction. Néanmoins, dans ces études, l'effet de l'inertie thermique n'a pas été conjugué à celui de la transmission thermique, puisque les deux paramètres peuvent varier. Kossecka et al. (2002) ont comparé la performance énergétique de plusieurs murs ayant la même valeur de transmission thermique U en tenant compte de la stratigraphie du mur et particulièrement de la position de l'isolant dans celui-ci. Les résultats ont démontré que la différence en termes de consommation totale d'énergie varie de 2.3% à 11.3% entre la solution optimale et la configuration du mur la moins efficace. De plus, en cas

de régime continu, la consommation énergétique dédiée au refroidissement n'est pas affectée par la stratification du mur.

Si l'efficacité énergétique des bâtiments est un sujet d'actualité et très en vogue dans les milieux académiques internationaux, il est en contrepartie peu abordé à l'échelle nationale. Peu de chercheurs s'y sont intéressés et cette thématique n'a été explorée que dans le cadre de quelques études restreintes. Ainsi, Imessad et al. (2014), dans leur travail analytique et expérimental portant sur la performance thermique d'un prototype de bâtiment résidentiel dans le climat méditerranéen, ont mené une optimisation de l'épaisseur de l'isolation en polystyrène expansé sur 4 systèmes de mur avec différents paramètres d'inertie thermique par simulation dynamique. La solution optimale a été obtenue grâce à l'épaisseur d'isolation considérée la plus élevée avec une variante légère du mur en tenant compte de la ventilation nocturne et des avant-toits.

Missoum et al. (2014) se sont intéressés aux avantages d'intégrer des stratégies de conception bioclimatique dans une habitation résidentielle à Chlef. Ils ont pu déterminer l'épaisseur optimale d'isolation pour les murs et le toit pouvant permettre la réduction de 49% de la demande d'énergie thermique et ce avec une épaisseur d'isolation de 8cm. Marif et al. (2013), de leur côté, ont évalué l'isolation interne et externe du mur de façade d'un bâtiment existant dans la région d'Adrar par la méthode des différences finies implicites afin d'obtenir une réduction de 5,4°C dans la surface interne du mur. Considérant l'efficacité énergétique et son impact économique, Bendara et al. (2019) ont étudié l'impact de l'isolation thermique et de la compacité sur l'efficacité énergétique. Ils ont pu définir une épaisseur d'isolation optimale de 3,95 cm pour les murs extérieurs, en considérant un studio agricole dans le cas du climat chaud et sec de Ghardaia.

Pour les climats chauds plusieurs études ont été consacrées à l'impact de l'inertie thermique sur la performance énergétique des bâtiments. Ferrari (2007) souligne que pour le cas du climat d'Italie, l'impact de la masse thermique est plus apparent sur la demande de chauffage en hiver plus qu'elle ne l'est sur le refroidissement. Pour un climat chaud du désert de Las Vegas (Nevada, USA), Zhu et al. (2009) ont conclu qu'adopter des murs isolés à haute masse thermique réduit la demande d'énergie de chauffage, mais augmente la charge de refroidissement.

Les bâtiments de bureaux ont fait l'objet d'un intérêt particulier de la part de plusieurs auteurs sur le sujet de l'inertie thermique (Verbeke et al, 2018). En effet, plusieurs recherches ont montré les effets probants de l'inertie thermique dans les bâtiments de bureaux, notamment celle réalisée par Jenkins (2009) suivi de l'étude d'Aste et al. (2015). Ainsi, il est apparu que les bâtiments de bureaux sont plus exposés aux risques de surchauffe dues aux gains de chaleur internes relativement élevés des occupants et des équipements, et particulièrement lorsqu'ils coïncident avec une période où les gains de chaleur solaires sont importants et de sa transmission à travers l'enveloppe. Par ailleurs, l'étude de Pfafferot et al. (2004) a mis l'accent sur l'intermittence de l'occupation dans les bâtiments de bureaux en montrant que celle-ci permet d'optimiser la demande énergétique, en chauffage et refroidissement par l'utilisation de l'inertie thermique des composants du bâtiment.

Lors d'une étude réalisée par Aste et al. (2015), l'effet de l'inertie thermique sur un bâtiment de bureaux caractérisé par une étanchéité à l'air et un bon isolement a été investi. Dans cette recherche, la simulation paramétrique portant sur 3 régions climatiques différentes a montré que les avantages potentiels de l'inertie thermique dépendent des conditions d'occupation intermittentes spécifiques. Les auteurs concluent que l'avantage de performance pour les bâtiments lourds est à peine perceptible dans certains cas, et ne devient pertinent qu'en présence d'une importante ventilation nocturne. Ceci est attribué au fait que dans les bâtiments étanches à l'air et bien isolés, le taux de renouvellement de l'air est limité et donc insuffisant pour permettre un processus de refroidissement passif par lui-même.

Pour montrer l'effet de la masse thermique d'un mur extérieur sur la charge de transmission, Hu et al., (2020) ont effectué une simulation numérique qui a porté sur les performances thermiques d'un bâtiment de bureaux standard dans diverses conditions météorologiques. Les auteurs ont mis en évidence l'effet de la masse thermique dans une saison transitoire avec un temps doux et ont conclu que la masse thermique dans la couche de béton intérieure avait des effets positifs en termes de performance de la température intérieure et de conservation de l'énergie.

Dans leur recherche Reilly et Kinnane (2017) ont présenté de nouveaux paramètres pour mesurer l'effet de la masse thermique sur l'énergie requise pour chauffer et refroidir les bâtiments. Les nouveaux paramètres ont été utilisés pour analyser l'impact de la masse thermique dans les climats chauds avec refroidissement actif et dans les climats froids avec

chauffage actif. Les résultats ont montré que les structures à masse thermique élevée sont susceptibles d'être efficaces dans les climats chauds. En revanche, dans les climats froids une masse thermique élevée peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie. Par ailleurs, les travaux de recherche de Sharaf (2020) ont établi la capacité de deux configurations différentes de masse thermique à réduire la consommation d'énergie consacrée au chauffage et à la climatisation tout en assurant un environnement intérieur thermiquement confortable dans le cas d'un climat chaud semi-aride. Les résultats ont démontré qu'il était possible de situer l'environnement intérieur dans la zone de confort thermique en appliquant la configuration à forte inertie thermique, ce qui, en conséquence, diminue fortement les besoins en énergie thermique.

La littérature abondante qui s'est intéressée aux parois opaques de la façade a réussi à fournir quelques grandes orientations. Notamment, les parties opaques doivent être conçues de manière à atteindre un seuil spécifique de rayonnement solaire incident, en définissant une orientation adaptée, en améliorant sa capacité d'auto-obscureissement obtenue en modifiant sa géométrie ou sa texture ou en utilisant des peintures de couleur claire sur les surfaces extérieures. A ce propos, dans son étude sur les enveloppes de bâtiments auto-ombragés, Capeluto (2003) a prouvé que cette stratégie a permis de réaliser des économies d'énergie égales à celles d'un revêtement à faible émissivité sur les surfaces vitrées des façades plates. De plus, cela a permis de réduire la charge énergétique dans le cas d'orientations multiples, avec des taux plus élevés pour les façades Est et Ouest des immeubles de bureaux dans le climat de Jérusalem.

Selon des objectifs similaires Caruso et al. (2015) ont défini, à travers une optimisation évolutionnaire, que certaines orientations sont plus favorables que d'autres en termes d'atténuation de l'effet maximal du rayonnement solaire. De plus, ils ont trouvé que le pire scénario est celui de la façade sud-ouest qui, en plus du temps d'insolation prolongé, tombe sous l'impact critique impliqué par les températures élevées de l'après-midi. Par ailleurs, Lavafpour et al. (2015) ont étudié l'effet de l'auto-ombrage pour plusieurs climats et orientations, et ont défini qu'il doit être réglé spécifiquement en fonction de chaque climat et que, bien qu'un angle d'inclinaison de façade plus faible réduise les charges de refroidissement, il implique également une augmentation significative des besoins de chauffage. Des conclusions similaires ont été obtenues par Kandar et al. (2019), dans lesquelles, une projection optimale d'auto-ombrage peut réduire de manière significative la consommation d'énergie de refroidissement dans les immeubles de bureaux pour le cas du climat chaud et humide de la Malaisie. En explorant l'effet

des stratégies d'auto-ombrage principalement appliquées sur les murs opaques, Liu et al. (2019) ont évalué la réduction d'énergie obtenue par l'utilisation de panneaux d'ombrage sur la façade d'un bâtiment résidentiel orientée vers l'ouest. Le processus d'optimisation a pris en compte la longueur et l'angle d'inclinaison des panneaux horizontaux et verticaux et une réduction de 8 % a été obtenue dans le climat de Hong Kong,

Dans une approche différente, Merhan et al. 2020, ont étudié la capacité d'auto-ombrage impliquée par la texture du mur solide opaque et son potentiel pour améliorer la performance thermique à l'intérieur des bâtiments dans un climat chaud et sec. Différents motifs géométriques ont été adoptés, et le rayonnement solaire incident pour chaque orientation considérée a été évalué. Dans chaque cas, une réduction significative de la température de la surface extérieure de la façade a été obtenue.

En plus de la texture, la couleur joue également un rôle crucial dans la limitation des radiations solaires absorbées. En effet, dans la recherche menée par Khadraoui et al. (2019) une approche expérimentale sur modèles réduits a été effectuée par des mesures intermittentes sur des cellules-test suivi de simulations dynamiques. Il a été conclu que la peinture froide (*cool paints*) pourvue de nanoparticules abaisse considérablement la température intérieure du bâtiment et améliore donc son efficacité énergétique. Dans une étude similaire, une généralisation de l'effet de la couleur du mur de façade sur l'efficacité énergétique du bâtiment a été établie par Yao et al. (2011). Le coefficient d'absorption solaire de la surface extérieure a été considéré comme un paramètre de simulation afin d'évaluer son effet sur la consommation énergétique du bâtiment en termes de chauffage et refroidissement. Il a été conclu que, pour le contexte d'étude considéré, il est pertinent d'adopter des surfaces de façade de couleur claire pour obtenir des besoins énergétiques plus faibles.

Dans un autre registre, plusieurs recherches se sont concentrées sur l'évaluation des performances thermiques et visuelles des surfaces vitrées des bâtiments, notamment, sur la possibilité d'améliorer l'efficacité énergétique en établissant une optimisation holistique de ces composants, voire en réduisant leurs impacts économiques et environnementaux de manière multi-objectifs. Mis à part que les surfaces vitrées ou fenestration, sont le principal contact visuel entre l'extérieur et l'intérieur, elles impliquent, surtout, des gains de chaleur relativement plus élevés que les surfaces opaques. Leur présence entraîne de multiples caractéristiques de conception et influence les objectifs de haute performance qui sont souvent corrélés avec

l'orientation de la façade. Dans la littérature, l'optimisation du système de fenestration dépend des dimensions de l'ouverture, souvent abordées comme le rapport entre les surfaces vitrées et opaques de la paroi à travers la métrique WWR. En outre, le choix des matériaux de la fenêtre a une influence sur la performance thermique (coefficient de gain de chaleur solaire, transmittance thermique) et visuelle (transmittance visuelle) de son vitrage à la performance thermique de son cadre (transmittance thermique). Enfin, il existe un potentiel considérable d'économie d'énergie lié à l'optimisation des systèmes d'ombrage fixes, mobiles et à commande dynamique.

Le rapport fenêtre/mur (WWR), est souvent corrélé à l'orientation de la façade du fait qu'il détermine son exposition aux radiations solaires. Il est de fait l'un des principaux paramètres de conception affectant la consommation d'énergie. Son augmentation influence négativement la consommation d'énergie finale du bâtiment, en particulier dans les climats chauds (Aste et al., 2018). Plusieurs critères notamment le type de bâtiment et sa localisation, ainsi que chaque orientation spécifique font qu'un WWR spécifique est exigé pour une utilisation optimale. Sur la base des caractéristiques climatiques, Susorova et al. (2013) ont simulé les performances énergétiques de bâtiments de bureaux. Les résultats ont démontré que la solution optimale, pour 6 zones climatiques différentes, est un WWR Nord se situant entre 20 et 30 %, et un WWR de 50 et 80 % pour la façade Sud. Pour les climats froids, ils ont conclu qu'augmenter le WWR augmente la consommation totale d'énergie. Le facteur climatique a été également considéré dans l'étude réalisée par Shaeri et al. (2019) où il s'agissait de déterminer le rapport WWR optimal des façades d'un bâtiment de bureaux selon plusieurs orientations dans trois villes iraniennes représentatives de 3 climats différents. Les résultats suggèrent qu'un WWR allant de 20 à 30% pour la façade Nord est optimal pour tous les climats, et varie en conséquence si l'on considère les façades Sud, Est et Ouest.

D'autres recherches portant sur le rapport WWR et son impact sur la performance énergétique des bâtiments ont été réalisées incluant d'autres facteurs comme le vitrage, la protection solaire ou l'orientation. Dans ce contexte, Poirazis et al. (2008) ont réalisé des simulations énergétiques de bâtiments de bureaux en étudiant des rapports fenêtre/mur (WWR) compris entre 30 et 100 %, ainsi que différentes options de vitrage, d'ombrage et d'orientation. Les résultats ont montré que les immeubles de bureaux avec un taux d'humidité relative plus faible sont plus économes en énergie. De plus, il s'est avéré que les bâtiments de bureaux ayant un rapport fenêtre-mur réduit consomment moins d'énergie.

Considérant diverses options de vitrage, Fallah (2019) a étudié l'impact du WWR sur l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels et éducatifs traditionnels dans le climat froid semi-aride en Iran. Les simulations numériques ont prouvé que pour le cas de façades Sud, un WWR de 30% est la solution optimale à condition qu'elles soient équipées de fenêtres à double vitrage. Par contre, elles ne devraient pas excéder 15% lorsqu'elles utilisent des fenêtres à simple vitrage. De leur côté Z. Yang et al. (2004) ont affirmé que pour le cas d'un bâtiment à deux étages, un WWR de 30% est responsable de 60% des déperditions de chaleur, alors que la réduction du taux d'ouverture vers 20% réduirait ces pertes d'énergie de 15%.

L'étude effectuée par Goia et al. (2016) a abouti à un WWR optimal de 35-45% quelle que soit l'orientation. De plus, les résultats ont révélé que la demande d'énergie primaire dépend plus des charges thermiques intérieures et du système d'ombrage adopté qu'elle ne l'est pour la géométrie. Par ailleurs, l'étude de Shen et al. (2013) sur un bâtiment de bureaux, a mis l'accent sur l'équilibre entre les éléments opaques et vitrées comme étant l'un des principaux paramètres de la façade affectant l'efficacité énergétique du bâtiment. Dans ce sillage, il a été démontré que l'équilibre entre ces deux parties peut fournir des informations pertinentes pour la conception de bâtiment à haute performances énergétiques.

En plus de l'aspect énergétique, Aste et al. (2018), ont considéré l'impact environnemental et économique impliqué par la consommation d'énergie électrique dans les immeubles de bureaux pour trois climats en Europe. Dans cette recherche, une analyse énergétique des propriétés influentes des fenêtres (géométriques, optiques et thermiques) et des dispositifs d'ombrage mobiles, suivie d'une évaluation du coût global a été effectuée afin de définir la solution optimale en termes de coût. Les résultats obtenus à partir du modèle de cellule d'essai calibré orienté Sud confirment que le WWR le plus bas de 20 % est le taux d'ouverture approprié dans les trois climats. En outre, les dispositifs d'ombrage mobiles réduisent de manière significative la consommation d'énergie, y compris les émissions de CO₂, même pour les valeurs les plus faibles du rapport WWR, en plus de leur capacité à réduire la sensation d'éblouissement et à améliorer les conditions de confort visuel, ce qui améliore la santé et la productivité des utilisateurs.

2. Situation du problème et questions de la recherche

En Algérie, le développement rapide du secteur du bâtiment et ses lourdes conséquences sur la consommation énergétique ont poussé les pouvoirs publics à mettre en place un plan d'efficacité énergétique dans le cadre d'un agenda à l'horizon 2030. Grâce à ce plan qui a démarré à partir de 2015, le gouvernement espère réduire substantiellement le taux faramineux d'énergie consommée par les bâtiments et dont une grande partie est utilisée pour répondre aux besoins du confort thermique (chauffage et climatisation) des utilisateurs.

Principalement axé sur les limitations des gains et des pertes de chaleur de l'enveloppe du bâtiment, ce plan d'efficacité énergétique des bâtiments est basé sur un ensemble de textes prescriptifs et de recommandations techniques (DTRs) en attendant la promulgation d'une véritable réglementation thermique nationale et son application rigoureuse. Ici, il faut souligner que les documents techniques et textes réglementaires ayant servi de références pour l'élaboration du plan, sont relativement peu précis. En effet, ils sont basés sur des calculs du comportement du bâtiment en régime permanent sans tenir compte du comportement transitoire propre à son fonctionnement thermique et, encore moins, des conditions limites. En outre, les DTRs actuellement en usage concernent les spécificités constructives des bâtiments résidentiels, et donnent peu d'orientations quand il s'agit des autres types de bâtiments du secteur tertiaire, notamment, les bâtiments administratifs qui constituent l'essentiel du parc immobilier tertiaire en Algérie (Khadhraoui, 2019).

Il faut aussi préciser que l'approche préconisée par le gouvernement algérien vis-à-vis de la question énergétique est fondée sur l'emploi généralisé de l'isolation thermique de l'enveloppe. Néanmoins, certaines lacunes persistent et risquent de compromettre ce projet de réglementation thermique algérienne puisque les documents techniques disponibles ne fournissent aucune directive ou prescription en ce qui concerne les valeurs de transmission thermique des toits, murs et fenêtres. De plus, ces aspects techniques normatifs qui font actuellement défaut ne sont traités que dans le cadre de recherches académiques avec de rares répercussions pratiques. De ce point de vue, il est évident qu'une réflexion sur l'adoption de mesures adéquates dans un souci d'efficacité énergétique du bâtiment est à engager dans l'immédiat.

Du fait de ses spécificités, le secteur du bâtiment (surtout tertiaire) devrait faire l'objet d'une attention particulière. D'après le rapport de l'APRUE (2019), la consommation

énergétique des bâtiments tertiaires et résidentiels en Algérie représente 43% de la consommation finale et surpasse de loin les autres secteurs. Malheureusement, force est de constater que la plupart des immeubles de bureaux sont caractérisés par leur manque de confort thermique flagrant (éclairage naturel insuffisant, excès de chaleur en été, problème de froid en hiver). Ils sont, de fait, de gros consommateurs d'énergie et dépendent exclusivement des installations électriques pour assurer leur climatisation. Cette situation est le résultat d'une pratique architecturale indifférente au contexte, où très souvent les paramètres thermiques, énergétiques et climatiques sont ignorés, surtout, lors de la conception et le choix des éléments de l'enveloppe (matériaux, façade vitrée et dispositifs inappropriés au contexte climatique) (Khadhraoui, 2019). La façade des bâtiments à usage de bureaux, en particulier, constitue un enjeu majeur en termes d'adaptabilité climatique et d'efficacité énergétique dont la performance relève de facteurs à la fois formels, matériels et techniques.

En Algérie, il existe bien des documents techniques (cahiers de charges, ...) qui fournissent certaines indications sur les aspects architecturaux et constructifs propres aux façades en particulier pour les bâtiments de bureaux et commerciaux. Néanmoins, ces documents sont plutôt à teneur formelle et visent à satisfaire le goût et l'appréciation du maître d'ouvrage et éventuellement des futurs utilisateurs. De ce point de vue, les façades dominées par le vitrage et les murs rideaux sont de plus en plus utilisées. Mimant l'esthétique de la transparence des bâtiments high-tech à haute performance environnementale mais avec une approche simpliste, ces façades n'intègrent malheureusement pas les technologies innovantes des modèles d'outre-mer pris comme références, comme elles n'appliquent pas leurs procédés ingénieux d'adaptation climatique. Très souvent des ratios d'ouverture importants sont utilisés sans aucun égard pour les exigences de régulation thermique. Dans les régions à climat chaud et aride le problème est encore plus compliqué. Ces zones aux conditions climatiques très rudes représentent plus de 89% de la superficie totale de l'Algérie. Dans ce type de conditions climatiques, le besoin en énergie de refroidissement représente la majorité de la consommation d'énergie dans le bâtiment.

Faisant fi des disparités régionales et des spécificités des différentes zones climatiques en Algérie, l'utilisation aléatoire des éléments de façades (matériaux, dispositifs, ratios d'ouverture, etc.) dans les immeubles de bureaux prend de l'ampleur et suscite d'innombrables questions quant aux graves conséquences d'une telle pratique. Il faut dire qu'il n'est pas rare de trouver les mêmes types de façades aussi bien au Nord (climat méditerranéen) qu'au Sud du

pays (climat chaud et aride). Bien entendu, les mêmes caractéristiques conceptuelles et matérielles sont utilisées indifféremment et quelle que soit la zone climatique. Il en résulte un inconfort thermique important et une augmentation de la consommation d'énergie due aux problèmes de surchauffe.

Face à cette situation, il s'avère difficile d'atteindre les objectifs d'efficacité énergétique tels que fixés par la législation pour les nouveaux bâtiments, tout comme il est assez complexe d'entreprendre des actions de rénovation sur des bâtiments existants. Néanmoins, diverses études ont quand même réussi à définir des méthodes permettant d'optimiser les surfaces opaques et vitrées des façades et d'évaluer leurs aspects formels et constructifs en fonction des conditions climatiques.

Ainsi, considérant que les surfaces vitrées de la façade sont cruciales dans le taux des échanges thermiques du bâtiment, une orientation inappropriée ou bien un type de vitrage mal choisi peuvent augmenter négativement les gains ou les pertes de la chaleur, ce qui contribue à affecter le confort thermique des occupants. De ce fait, les fenêtres ont un effet considérable sur la consommation d'énergie du bâtiment ; ils sont responsables d'une grande partie du gain et de la perte de chaleur qui se produisent simultanément au niveau de l'enveloppe du bâtiment

De même, la performance énergétique des surfaces opaques est principalement évaluée sur la base de sa transmittance thermique en tenant compte de l'épaisseur de l'isolation pendant la phase opérationnelle du bâtiment. Cependant, en raison de l'importance de la masse thermique de la paroi extérieure, rares sont les études en Algérie qui se sont penchées sur la variation de son comportement transitoire dans le processus, ou qui ont considéré l'énergie intrinsèque de ses composants. À notre connaissance, aucune recherche n'a considéré leur comportement interconnecté en appliquant une approche holistique dans un climat chaud et sec tout en tenant compte du régime intermittent propre aux bâtiments à usage de bureaux.

En outre, seulement quelques travaux ont tenté d'évaluer l'impact de la couleur de la surface extérieure du mur de façade, définie par son coefficient d'absorption solaire, alors que l'impact de la couleur en faisant varier les propriétés thermo-physiques et dynamiques du mur relativement à un climat chaud et sec, reste un champ encore peu exploré. Par ailleurs, très peu de recherches ont considéré le potentiel d'économie d'énergie lié à la limitation de l'impact des radiations solaires sur les surfaces opaques, surtout, relativement au climat chaud et sec.

En ce qui concerne les surfaces vitrées de la façade et l'influence de l'ombrage (protections solaires, occultations, etc.) vis à vis de leur comportement thermique, un nombre appréciable d'études ont été réalisées au niveau national et ont traité le sujet sous divers angles et dans différents contextes climatiques. Cependant, à notre connaissance, très peu d'entre elles ont évalué l'interconnexion entre ses composants à travers une approche holistique, et aucune n'a évalué un système d'ombrage mobile contrôlé, ni spécifié les facteurs les plus impactant pour le comportement intermittent d'un bâtiment de bureaux sous les conditions d'un climat chaud et sec.

Afin de combler les lacunes relevées, le présent travail de recherche vise à comprendre et à évaluer l'impact des aspects formels et des composants constructifs de la façade d'un bâtiment, et d'examiner jusqu'à quel point les choix matériels permettraient de rationaliser et de libérer les décisions architecturales formelles dans la perspective d'une approche d'adaptabilité climatique et d'efficacité énergétique du bâtiment tertiaire sous les conditions climatiques chaudes et arides du sud de l'Algérie. En prenant les bâtiments à usage de bureaux de la ville de Biskra comme exemple, cette recherche tente de répondre à un certain nombre de questions, notamment :

- **Quels impacts les aspects formels et constructifs des façades impliquent-ils sur l'efficacité énergétique des bâtiments de bureaux et dans quelle mesure la réduction énergétique peut-elle être envisagée dans un climat chaud et sec pour ce type de bâtiments ?**

Les sous-questions suivantes seront également explorées :

1. Peut-on réduire la consommation d'énergie des bâtiments de bureaux au regard du régime intermittent de leur utilisation sans tomber dans une corrélation inadéquate entre les composants de la façade (parties opaques et surfaces vitrées) ?
2. À quels degrés la géométrie des parties opaques peut-elle contribuer à réduire la consommation énergétique ?
3. Quelles spécificités doivent présenter les surfaces vitrées pour le cas d'un bâtiment de bureaux dans un climat chaud et sec afin de réduire sa consommation d'énergie de refroidissement, de chauffage et d'éclairage, sans compromettre les avantages que les utilisateurs peuvent tirer d'un contact bénéfique avec l'environnement extérieur ?

3. Hypothèses

La façade est un élément majeur constituant l'enveloppe. Selon sa **configuration** qui se définit à travers son **aspect formel** et **constructif-matériel**, la façade joue le rôle de **modulateur d'ambiances thermiques** du bâtiment. En outre, **l'adaptabilité climatique** et **l'efficacité énergétique** sont le résultat de l'adéquation entre les variables technologiques, matérielles et formelles en corrélation avec les caractéristiques climatiques précises d'un lieu donné. De ce point de vue, la présente étude admet les hypothèses suivantes :

- Le comportement distinct et les gains internes relativement élevés des occupants et des équipements, tels que l'éclairage artificiel, les appareils divers (ordinateurs, photocopieurs, ... etc.) qui caractérisent les immeubles de bureaux les rendent plus enclins aux risques de surchauffe ; cet effet pouvant être fortement accru dans les régions chaudes et arides. Comme la conception de la forme du bâtiment dans ce contexte se concentre sur la minimisation des gains solaires des différents composants de l'enveloppe, les besoins thermiques relativement élevés principalement dédiés au refroidissement pourraient donc être minimisés en adoptant des mesures constructives et formelles adéquates relatives à la configuration appropriée des composants de la façade, améliorant ainsi son efficacité énergétique.
- Plus précisément, en raison de l'occupation intermittente qui caractérise la plupart des immeubles de bureaux et de l'interdépendance entre les propriétés thermo-physiques des surfaces opaques de la façade, le niveau d'isolation, la masse thermique et la couleur du revêtement peuvent permettre un équilibre de la demande d'énergie thermique et par conséquent de la consommation d'énergie.
- En outre, si des surfaces vitrées plus grandes peuvent garantir un niveau d'éclairage confortable dans les espaces de travail, et ainsi réduire les besoins en éclairage artificiel ; paradoxalement, elles peuvent également affecter la demande d'énergie thermique due à la surchauffe. Par conséquent, dans le cas de climats chauds et secs, caractérisés par un rayonnement solaire intense, une configuration judicieuse de l'ouverture associée au bon choix du type de vitrage et un système d'ombrage adéquat peuvent réduire considérablement la consommation totale d'énergie.
- Par ailleurs, il est supposé que les besoins énergétiques puissent également être réduits en permettant une approche d'auto-ombrage dans la conception de la surface opaque de la façade.

4. Analyse conceptuelle

Une analyse conceptuelle est établie afin de mieux cerner les assertions formulées au niveau des hypothèses. Le but étant de faire ressortir les mots clés (concepts) puis de les traduire en dimensions et enfin les concrétiser en indicateurs qui prennent la forme de phénomènes mesurables. Dans le cas de la présente recherche, les dimensions au nombre de trois (03) s'apparentent à des variables indépendantes (Aspects Formels de la Façade, et Aspects Constructifs de la Façade) et variable dépendante (Efficacité Energétique du Bâtiment).

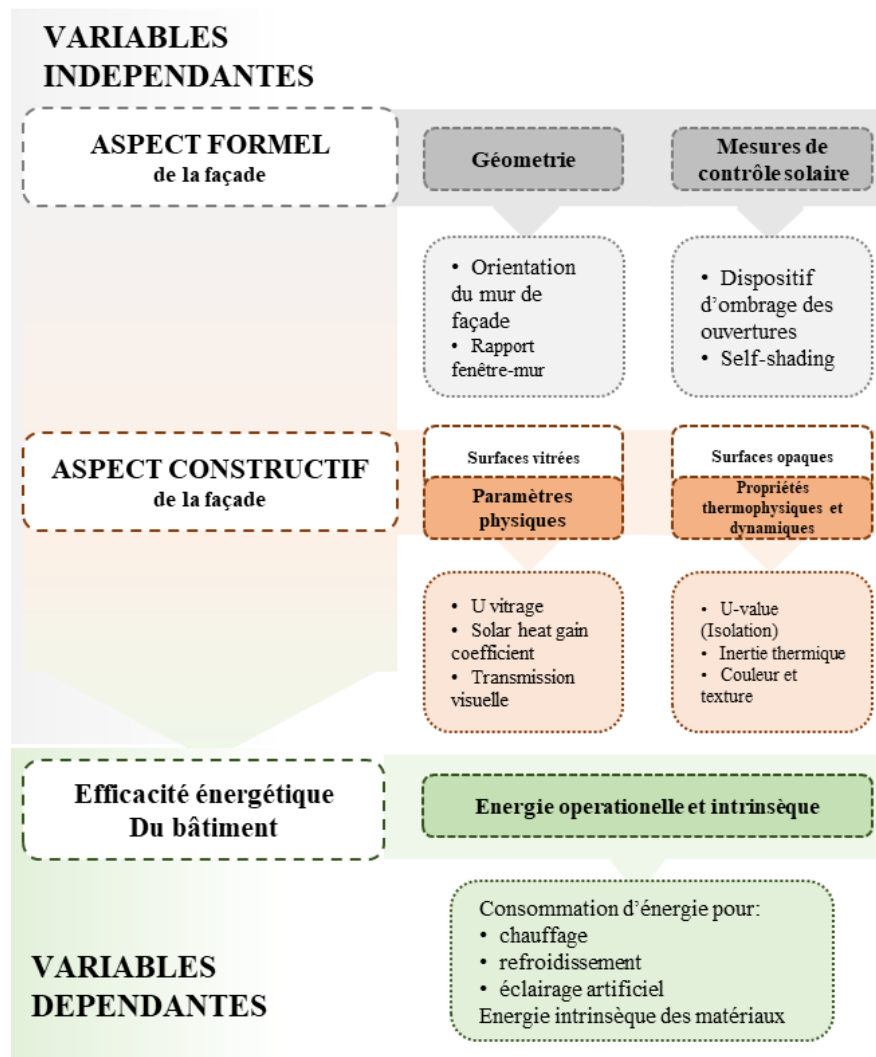


Figure 1 : Organigramme du processus de l'analyse conceptuelle

La Figure 1 résume l'interconnexion établie entre les variables et les indicateurs (paramètres mesurables) de la façade pour aboutir à l'efficacité énergétique du bâtiment relativement à un climat chaud et sec. Il apparaît que la configuration de la façade et, notamment, les paramètres caractérisant ses aspects formels et constructif-matériel sont susceptible de jouer un rôle central

dans le comportement thermique du bâtiment et implicitement contribuent considérablement à l'efficacité énergétique.

5. Contexte et objectifs de la recherche

Le principal objectif de cette recherche est d'arriver à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments à usage de bureaux relativement à un contexte climatique chaud et sec, en agissant sur les composants vitrés et opaques de la façade et, notamment, les paramètres caractérisant ses aspects formels et constructif-matériel. L'étude porte sur l'évaluation et, ensuite, l'optimisation des spécificités constructives et des mesures conceptuelles d'appoint mises en œuvre dans les différentes parties opaques et vitrées de la façade.

La ville de Biskra est choisie pour servir de contexte d'étude, son climat étant représentatif des conditions chaudes et arides, en outre, elle regroupe un grand nombre de bâtiments de bureaux sièges des différentes directions et administrations. Ces bâtiments présentent une diversité de typologies architecturales et de traitement de façades et, de ce fait, ils permettent d'avoir une idée exacte sur les pratiques constructives actuelles propres aux immeubles de bureaux telles qu'elles s'effectuent à travers le territoire national.

Plus précisément, à son issue l'étude espère développer une façade performante qui puisse répondre de façon optimale aux exigences d'un bâtiment tertiaire dans un climat chaud et aride tout en assurant une adaptabilité climatique (ambiance thermique agréable) et une consommation énergétique rationnelle. De ce point de vue, cette recherche s'inscrit dans une optique visant à :

1. Développer une méthode d'évaluation appropriée des propriétés thermo-physiques et dynamiques des murs extérieurs des bâtiments, en tenant compte de leur transmission thermique (U). L'approche est basée sur l'épaisseur de l'isolation, en fonction du niveau d'inertie thermique. L'objectif étant d'optimiser l'équilibre entre le chauffage, le refroidissement et les impacts environnementaux.
2. Déterminer des lignes directrices morphologiques et constructives spécifiques pour les paramètres des surfaces vitrées : ratio moyen d'ouverture (WWR) de la fenêtre en fonction de ses paramètres physiques et optiques et de l'orientation du mur de façade.

3. Évaluer le potentiel d'économie d'énergie en termes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage, des stores extérieurs intelligents assistés par un algorithme de contrôle et d'actionnement.
4. Évaluer le niveau approprié de rayonnement solaire incident sur les surfaces opaques et déterminer la valeur optimale du coefficient d'ombrage pour chaque orientation.
5. Développer un modèle de référence basé sur une analyse descriptive à caractère qualitatif et quantitatif des immeubles de bureaux, en mettant l'accent sur les aspects constructifs, morphologiques et énergétiques des façades dans le contexte de l'étude, dans la perspective d'une utilisation éventuelle comme modèle énergétique calibré pour l'ensemble du bâtiment pour des recherches futures.

6. Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs escomptés par la présente recherche, un cadre méthodologique a été élaboré ; il s'appuie sur trois approches fondamentales : conceptuelle, empirique et numérique et se décline en quatre phases principales.

1. **Une revue exhaustive de la littérature** : où une analyse théorique approfondie est effectuée sur la littérature existante afin de cerner l'état de l'art sur le thème étudié, en mettant l'accent sur la façade en tant que modulateur environnementale, l'efficacité énergétique des bâtiments à usage intermittent et les paramètres qui influencent leur performance. Un intérêt particulier est porté aux politiques d'efficacité énergétique et les réglementations en vigueur régissant le domaine de la construction, grâce à l'exploration de sites Web connexes et de rapports et statistiques gouvernementaux concernant les alternatives et solutions techniques pour faire face à la situation énergétique actuelle du secteur tertiaire dans le contexte algérien. Par la suite, un historique de la notion de façade performante en rapport avec le contexte de l'étude est établi, tout en passant en revue les principaux paramètres physiques de la façade. L'objectif principal est d'acquérir une compréhension des solutions techniques en matière de conception et de construction des façades à haut rendement énergétique afin de déterminer les principales conditions limites et les paramètres de fonctionnement qui seront ensuite utilisés dans la partie analytique du contexte d'étude, ainsi que dans l'optimisation énergétique du cas d'étude.

2. **Analyse des pratiques constructives actuelles des immeubles de bureaux dans le contexte de l'étude** : dans un premier temps, une présentation est faite du climat chaud et sec, spécifique au contexte d'étude, afin de déterminer les problèmes constructifs qui occultent les directives de conception spécifiques à ce climat. Par la suite, un diagnostic qualitatif et quantitatif des données recueillies, sur un échantillon de bâtiments de bureaux réalisés au cours des deux dernières décennies, est traité avec un intérêt particulier. Ce diagnostic est réalisé pour mettre en évidence les solutions techniques appliquées dans la conception des façades ayant trait à la consommation énergétique dans le bâtiment. Enfin, une synthèse basée sur ces données spécifiques a conduit au choix d'un cas d'étude représentatif utilisé comme support pour l'élaboration d'un modèle énergétique calibré dans le cadre de cette recherche.

3. **Elaboration du modèle énergétique du bâtiment** : dans cette partie préliminaire à l'analyse, une calibration et une validation du modèle énergétique sont réalisées sur le bâtiment, cas d'étude. Pour ce faire, des documents techniques ont été exploités, ainsi que des mesures sur site pour procéder aux corrections du modèle. Deux autres techniques de collecte de données à savoir l'observation directe et l'enquête, ont également été utilisées. L'objectif étant de fournir une compréhension approfondie des conditions limites du bâtiment, de trouver une interprétation des paramètres de fonctionnement du système CVC et du comportement des utilisateurs afin de pouvoir résumer les charges internes (équipement, éclairage et occupation) du bâtiment de référence. Ce travail a fourni une interprétation plus précise du bilan énergétique du bâtiment, notamment l'exactitude de la consommation d'énergie électrique dédiée respectivement au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage.

4. **Optimisation orientée vers une façade à haute performance** : après avoir défini les paramètres clés liés à la façade et à la performance énergétique du bâtiment en exploitant la littérature existante sur le sujet, la partie optimisation a été réalisée selon 3 étapes consécutives. Chacune évalue l'impact de l'un des composants de la façade sur l'efficacité énergétique du bâtiment au moyen de l'outil de simulation "EnergyPlus" sous la plateforme paramétrique de Grasshopper et les plugins environnementaux "Ladybug & Honeybee". Ainsi, c'est d'abord l'aspect matériel-constructif des parois opaques qui est évalué et optimisé ; ensuite, ce sont les surfaces vitrées qui sont étudiées en mettant l'accent sur les caractéristiques techniques du vitrage, le rapport fenêtre/mur, et la présence ou non des dispositifs d'ombrage ; et finalement l'effet du self-shading a été évalué en simulant plusieurs alternatives d'ombrage

appliquées sur les parois opaques du bâtiment selon différentes orientations. Le processus d'analyse et d'optimisation est résumé ci-après pour chaque phase :

- **Étape 1 : Optimisation des surfaces vitrées** : les caractéristiques techniques du vitrage, comprenant différents types de fenêtres et le ratio d'ouverture (rapport fenêtre/mur WWR), ont été simulées de manière paramétrique avec et sans dispositifs d'ombrage, afin d'obtenir un équilibre optimal entre la consommation d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage.
- **Étape 2 : Optimisation des paramètres des surfaces opaques** : une méthode est développée pour une évaluation appropriée des propriétés thermo-physiques des murs extérieurs des bâtiments. Cette approche consiste en une simulation paramétrique incluant 3 parois potentielles avec différents paramètres d'inertie thermique (facteur de décrétement et déphasage) et une épaisseur d'isolation variable; elle aboutit à une valeur-U optimale en accord avec un niveau adéquat d'inertie thermique à utiliser comme guide constructif pour les immeubles de bureaux dans les climats chauds et secs. L'évaluation consiste à déterminer l'équilibre optimal entre la consommation d'énergie opérationnelle consacrée au chauffage et au refroidissement, et aux impacts environnementaux impliqués par l'énergie intrinsèque de la solution d'isolation suggérée.
- **Étape 3 : Optimisation du coefficient d'ombrage des parois opaques** : sur la base de recherches antérieures, une approche a été adoptée pour optimiser la quantité de rayonnement solaire incident sur les surfaces opaques grâce à l'effet de l'auto-ombrage (self-shading). L'objectif est de limiter les effets de surchauffe et de réduire ainsi les besoins de refroidissement, un problème majeur dans les climats chauds et secs, tout en garantissant un bon seuil pour les périodes de chauffage.

7. Structure de la thèse

Ce manuscrit est divisé en trois parties : théorique, analytique et pratique qui correspondent respectivement aux étapes successives de la recherche. La thèse comporte six chapitres en plus du chapitre introductif et de la conclusion générale. La première partie conceptuelle et théorique est consacrée à la compréhension générale des concepts-clé et notions relevés dans la littérature ; elle concerne les trois premiers chapitres. A travers une recherche bibliographique sur le thème traité, elle établit un état de l'art sur le sujet tout en pointant les écrits et travaux qui l'ont traité et leurs aboutissements. La seconde partie correspond au 4^{ème},

5^{ème} et 6^{ème} chapitre. Le premier de ces chapitres est méthodologique, il décrit le contexte et le corpus de l'étude ainsi que les méthodes adoptées dans le traitement du sujet. En contrepartie, les deux autres chapitres sont pratiques et analytiques et de fait ils se focalisent sur le travail expérimental. Ainsi, ils présentent et expliquent le protocole de la prise de mesures, la simulation et l'interprétation des résultats afin de répondre à la problématique posée et vérifier les hypothèses fondant le travail de recherche.

La structure de cette thèse se décline comme suit :

- **Le chapitre introductif** présente une introduction au sujet de la recherche et sa visée ; un aperçu sur de la littérature existante portant sur le phénomène étudié et des questions de recherche sont également fournies. Sur la base de cette analyse préliminaire du sujet, une hypothèse est émise dans le but de répondre au problème soulevé en amont ; elle propose une solution provisoire qui sera le fil conducteur du travail d'investigation. Plus loin, le chapitre introductif définit les objectifs de la recherche puis une analyse conceptuelle fondée sur les mots-clés de l'hypothèse est effectuée. Ce chapitre aborde également les grands traits de la méthodologie adoptée avec un accent sur les approches les plus récentes et les méthodes adoptées pour résoudre les problèmes spécifiques à l'optimisation énergétique des façades des bâtiments. Pour finir, la structure globale de la thèse est présentée.

- **Le chapitre 1** englobe deux parties ; la première aborde l'application du concept de l'efficacité énergétique en soulignant le rôle des stratégies de conception actives et passives, et en donnant une vue d'ensemble sur les critères d'évaluation, les outils de simulation énergétique et les certifications. En outre, cette partie met l'accent sur les aspects opérationnels et intrinsèques propre à la performance énergétique des constructions. La deuxième partie se concentre sur l'aspect énergétique et environnemental des bâtiments tertiaires, la nature de la politique et de la réglementation algérienne existante dans le domaine et les solutions adoptées sont également passées en revue.

- **Le chapitre 2** est, quant à lui, consacré aux stratégies de conception des façades de bâtiments climatiquement performantes. Une vue d'ensemble des facteurs climatiques caractérisant les régions chaudes et sèches est fournie et les paramètres de conception adaptés à un tel climat sont suggérés.

- **Le chapitre 3** se concentre sur les paramètres matériels des éléments de la façade. Ainsi, les propriétés thermo-physiques et dynamiques des parois opaques sont explorées, alors qu'un aperçu des différentes solutions d'isolation est présenté. Le chapitre s'intéresse, également, aux méthodes de définition de l'inertie thermique des parois, de même qu'à l'influence de la texture de la surface et des propriétés des surfaces vitrées sur le fonctionnement thermique de la façade. Enfin, les solutions d'ombrage pour les surfaces vitrées et opaques sont étudiées.

- **Le chapitre 4** est d'ordre méthodologique et analytique et se divise en deux parties. La première présente le contexte climatique de la recherche et décrit le corpus de l'étude et ses caractéristiques ainsi que le protocole empirique exploité pour la collecte de données. Un diagnostic qualitatif et quantitatif sur un échantillon d'immeubles de bureaux est en outre effectué afin de mieux comprendre l'impact des éléments de la façade sur le fonctionnement thermique du bâtiment. Une analyse et comparaison de leur performance est réalisée et finalement un cas d'étude est sélectionné. La deuxième partie du chapitre présente l'outil de simulation dynamique Rhinoceros/Grasshopper avec les plugins environnementaux "Ladybug & Honeybee" fournis par EnergyPlus. Une validation et calibration préliminaire du modèle énergétique du bâtiment cas d'étude est effectuée. Parallèlement, la définition des conditions limites et des paramètres de fonctionnement du modèle de référence a été effectuée comme préliminaire à l'étape de l'étude paramétrique par simulation. Celle-ci concerne l'évaluation de l'impact des composants de la façade du bâtiment (surfaces opaques et vitrées et solutions d'ombrage) et leur optimisation.

- **Le chapitre 5** décrit la partie expérimentale et le processus d'évaluation et d'optimisation paramétrique consacrée aux surfaces vitrées de la façade en vue d'améliorer la performance énergétique du bâtiment. Autrement dit, cette partie de l'analyse s'intéresse à l'aspect matériel-constructif relativement à la composante vitrée de la façade. Dans cette optique, l'étude paramétrique du modèle énergétique calibré s'appuie sur l'analyse d'une cellule-test virtuelle représentant un bureau-type du bâtiment cas d'étude. Le protocole expérimental est fondé sur l'utilisation d'un système d'ombrage dynamique actionné par un algorithme de contrôle de l'ensoleillement et combiné en parallèle à un module de diminution automatique de l'éclairage artificiel et devant assurer le confort visuel. Les résultats obtenus mettent en exergue le comportement thermique des composants des surfaces vitrées et déterminent la meilleure combinaison du ratio d'ouverture (WWR), type de fenêtre et configuration de système

d'ombrage par rapport à chaque orientation de façade définie relativement au contexte de l'étude.

- **Le chapitre 6** : présente la deuxième étape de l'étude paramétrique et aborde l'évaluation et l'optimisation des performances énergétiques des parois opaques en proposant des alternatives d'auto-ombrage. C'est donc l'aspect formelle de la façade qui est maintenant ciblé, puisque les zones ombragées (simulées et calculées) permettent de quantifier les éventuels décrochements, éléments saillants horizontaux, etc. qui à leur tour sont déterminant pour la configuration de la façade et son apparence. Ainsi, la première partie du chapitre présente l'approche adoptée pour l'analyse du comportement thermique de la façade en termes de chauffage et refroidissement sous l'effet de la variation simultanée de la masse thermique du mur défini par sa stratification. Cette méthode puisée dans la littérature, consiste à étudier l'effet de l'isolation (épaisseur, matériaux, stratification, etc.) sur la consommation énergétique opérationnelle, puis considère l'impact de l'énergie intrinsèque induite par la quantité d'isolation nécessaire sur la consommation d'énergie primaire. La deuxième partie du chapitre est basée sur une méthode mimant l'effet de self-shading. Elle évalue l'effet des zones ombragées appliquées sur les parois opaques de ce bâtiment. Les résultats, en plus d'évaluer le comportement thermique des parois en termes de transmission thermique et d'inertie thermique, définissent le type de mur, l'épaisseur de l'isolant et les seuils d'ombrage optimaux pour le cas de bâtiments de bureaux dans le climat chaud et aride. Dans la dernière étape, l'analyse et la discussion des résultats obtenus a permis d'examiner chacun des paramètres ciblés par l'étude et d'évaluer leur impact isolé et combiné sur la performance climatique et énergétique du bâtiment.

Enfin, la thèse est parachevée par une **conclusion générale** qui présente une synthèse des différentes parties réalisées, récapitule les résultats généraux obtenus et répond aux principales questions de la problématique. Sur la base des aboutissements de la recherche, un ensemble de recommandations sont suggérées, notamment, certaines directives de construction concernant la conception de façades d'immeubles de bureaux hautement performantes dans le cas de climats chauds et secs. Enfin, cette partie s'arrête sur les limites de l'étude et suggère de futures axes et perspectives de recherche.

Chapitre I

Effacité énergétique, législation et stratégies
conceptuelles dans les bâtiments de bureaux

CHAPITRE I. Efficacité énergétique, législation et stratégies conceptuelles dans les bâtiments de bureaux

I.1. Introduction

L'effort mondial d'atténuation des émissions de CO₂ associée à une réduction de la consommation d'énergie primaire d'environ 40% à l'horizon 2050 souligne l'intérêt accordé à l'efficacité énergétique à travers le monde. Pour atteindre cet objectif, plusieurs pays ont conçu des codes de construction en mettant l'accent sur les options de conception à haut rendement énergétique pour la maîtrise de leur demande en énergie dans le but avéré est de rendre les bâtiments plus efficaces sur le plan énergétique tout en favorisant le confort et la santé de leurs occupants.

Le présent chapitre aborde l'application du concept de l'efficacité énergétique en soulignant le rôle des stratégies de conception actives et passives, et en donnant une vue d'ensemble sur les critères d'évaluation, les outils de simulation énergétique et les certifications. En outre, il met l'accent sur les aspects opérationnels et intrinsèques propre à la performance énergétique des constructions. Enfin, l'aspect énergétique et environnemental des bâtiments tertiaires est abordé, de même que la nature de la législation et de la réglementation algérienne existante dans le domaine et les solutions adoptées, sont passées en revue.

I.2. Définition

Le terme "*efficacité énergétique*" a plusieurs définitions, qui peuvent parfois compliquer la compréhension du terme et donc sa mise en œuvre. D'après George Baird (1984), l'efficacité énergétique consiste à utiliser la plus petite quantité d'énergie possible pour l'éclairage, le refroidissement, le chauffage et les équipements. Elle consiste simplement à utiliser moins d'énergie pour obtenir la même quantité de rendement utile.

I.3. Avantages de l'efficacité énergétique

La réduction des besoins d'importation et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et l'économie dans la baisse des coûts pour les consommateurs sont autant d'avantages de l'efficacité énergétique. Si la technologie des énergies renouvelables peut aider à atteindre ces objectifs, l'amélioration de l'efficacité énergétique est l'option la plus rentable, en plus d'être la plus rapide, pour minimiser l'utilisation des combustibles fossiles.

Les avantages environnementaux et économiques évidents d'une réduction de la consommation d'énergie, ainsi que les gains potentiels, sont autant de raisons convaincantes d'optimiser la consommation d'énergie.

- **Protection de l'environnement**

Les bâtiments sont souvent à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre, qui peuvent être considérablement réduites par la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique qui est une excellente stratégie pour diminuer les émissions de carbone.

- **Réduction des dépenses sur l'énergie**

Les coûts énergétiques peuvent représenter une part importante des dépenses récurrentes. L'utilisation d'appareils à haut rendement énergétique permet de consommer moins d'énergie pendant toute leur durée de vie sans perdre en qualité et constitue un excellent moyen de faire des économies substantielles.

I.4. Evaluation de l'efficacité énergétique du bâtiment

L'évaluation de l'efficacité énergétique, à l'échelle mondiale, se fait au moyen de certificats comme outils d'estimation de la qualité environnementale. Un certificat d'efficacité énergétique est destiné à fournir des informations sur la consommation d'énergie du bâtiment et sur sa cote d'efficacité énergétique (IEA, policy pathway).

I.4.1. Méthodes de certification

Afin de répondre aux exigences environnementales et d'assurer la préservation d'un environnement sain où se posent les questions du climat et de l'énergie, des méthodes de certification durable ont été développées en réponse à une préoccupation devenue universelle concernant le changement climatique causé par l'activité humaine sur l'atmosphère et les ressources en eau (Brundtland, 1987).

Les certificats d'efficacité énergétique ont des objectifs variés et sont présentés sous différentes classifications en fonction des types de bâtiments et des ouvrages neufs ou existants. Parmi les systèmes utilisés dans le monde, citons les suivants : (Rahmouni, 2020)

- **PassivHaus**

Le label allemand Passivhaus est une certification attestant qu'un bâtiment répond à certains critères en matière d'efficacité énergétique. Il s'agit de l'abréviation de "maison passive", qui désigne une habitation qui n'utilise aucun système de chauffage nécessitant une quantité importante d'énergie. Le standard Passivhaus est un concept global pour la création de structures ayant une très faible consommation énergétique globale. L'objectif de cette idée est de concevoir des bâtiments qui ne nécessitent pas l'utilisation de méthodes de chauffage conventionnel (archidesign)

- **LEED.**

En 1998, le United States Green Building Council a mis au point ce que l'on appelle aujourd'hui la certification LEED, qui signifie "*Leadership in Energy and Environmental Design*". Il s'agit d'un système de qualification ainsi que d'une norme internationale qui évalue les bâtiments en fonction de la qualité de la stratégie et des pratiques environnementales qu'ils appliquent. Cette norme a été élaborée par le Green Building Certification Institute (GBCI).

- **BREEAM**

La certification BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) a été développée au Royaume-Uni en 1986. Il s'agit de la technique la plus ancienne et la plus largement utilisée pour évaluer et certifier la performance environnementale des bâtiments.

- **NF HQE**

La certification française HQE "Haute Qualité Environnementale" a été créée dans les années 1990. La certification Haute Qualité Environnementale met l'accent sur les mesures prises pour minimiser l'impact environnemental des projets immobiliers.

- **BCA Green Mark**

La certification Green Mark est un système d'évaluation des bâtiments écologiques qui a été introduit pour la première fois en janvier 2005. Elle fournit un cadre complet pour l'analyse de la performance environnementale globale des bâtiments, dans le but de promouvoir une conception durable.

- **BBC-Effinergie**

Depuis sa création en 2009, le label Effinergie Patrimoine sert de certification française innovante pour l'efficacité énergétique des bâtiments. Sa vocation première est de faire converger la protection des biens culturels et la réhabilitation des systèmes énergétiques. (Effinergi.org)

- **CASBEE**

Le label CASBEE, qui signifie *Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*, est la marque du Japan Sustainable Building Council (JSBC). Elle vise à améliorer la qualité de vie des occupants tout en réduisant la quantité de ressources et les dommages environnementaux causés par l'environnement bâti pendant toute sa durée de vie. (JSBC, ibec.org)

I.5. Formes de consommation énergétique dans le bâtiment

Un bâtiment consomme de l'énergie de plusieurs manières durant son cycle de vie ; dans la fabrication, de la distribution et du transport des matériaux de construction « énergie intrinsèque » ; pendant la construction du bâtiment « énergie induite » et pendant le fonctionnement du bâtiment, de ses équipements et appareils « énergie opérationnelle ».

I.5.1. Énergie intrinsèque

Le terme "énergie intrinsèque" désigne la somme de tous les intrants énergétiques consommés au cours de la durée de vie d'un produit. L'énergie intrinsèque récurrente d'un bâtiment indique l'énergie requise pour entretenir, remplacer et recycler les matériaux et les composants du bâtiment tout au long de sa durée de vie (Hu, 2019).

I.5.2. Énergie induite

Comme elle est généralement beaucoup moins importante que l'énergie intrinsèque, on ne lui accorde généralement pas autant d'attention qu'à cette dernière. Il est essentiel de s'assurer, dès le départ, qu'une politique préalable d'économie d'énergie est mise en œuvre sur le site.

I.5.3. Énergie opérationnelle

C'est l'énergie qui est consommée pour le fonctionnement du bâtiment, et la consommation de cette énergie se poursuivra pendant toute la durée de vie du bâtiment, qui peut s'étendre sur de très longues périodes. Cette forme d'énergie est citée comme étant la source de la plus grande inquiétude parmi les architectes, les chercheurs et les législateurs.

Le moyen le plus efficace d'économiser l'énergie est de concevoir un bâtiment de manière à utiliser au mieux l'énergie naturelle : les rayons du soleil, le vent, la lumière du jour.

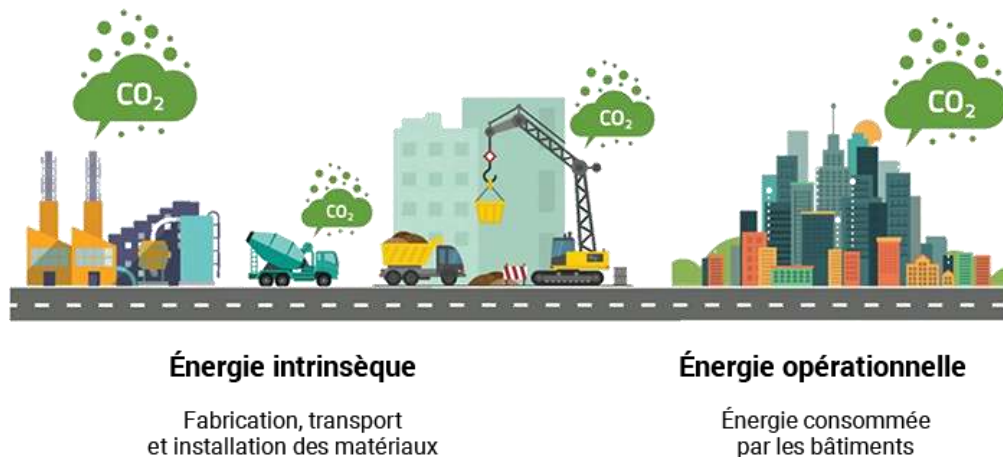


Figure I.1 : Formes de consommation énergétique (source : < <https://www.tellementbois.com>>)

I.6. Stratégies de conception énergétique

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à la recherche de nouveaux procédés et moyens de préserver l'énergie dans les structures par des stratégies d'efficacité énergétique. (Erebor et al, 2021) a révélé la prépondérance de différentes idées sur les diverses stratégies visant à atteindre l'efficacité énergétique dans les constructions et particulièrement les bâtiments de bureaux.

I.6.1. Stratégies de conception passive

Les stratégies passives utilisent les ressources locales fournies par la nature pour assurer le confort des bâtiments et l'économie d'énergie. Ces stratégies sont basées sur une bonne orientation du bâtiment, la forme du bâtiment, les matériaux de construction et les systèmes d'enveloppe du bâtiment à même de minimiser les demandes en énergie du bâtiment (Akinbami et al., 2009).

I.6.1.1. La forme

Les caractéristiques de forme d'un bâtiment sont des éléments prépondérants dans la stratégie de conception passive et la gestion des demandes de chauffage et refroidissement du bâtiment. (Ourghi et al., 2007). Celle-ci se définit comme le rapport entre le volume d'une structure et la surface de ses murs extérieurs.

I.6.1.2. L'orientation

L'orientation du bâtiment est un facteur clé dans la conception du chauffage solaire passif. Cette technique, dont l'objectif principal est de trouver un équilibre entre l'exposition de l'enveloppe du bâtiment au soleil et au vent, permet d'utiliser les composants du bâtiment à bon escient pour stocker et libérer les gains de chaleur solaire.

I.6.1.3. L'inertie thermique

L'inertie thermique est une propriété de la capacité d'un matériau à absorber, stocker et libérer la chaleur. En climat présentant une forte chaleur de jour en nuit, l'utilisation de murs à bonne inertie thermique permet de retarder la vague de chaleur qui traversera les parois du bâtiment pendant la journée, et par conséquent de se protéger de la chaleur pendant les heures de canicule.

I.6.1.4. La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est une méthode de ventilation passive sans apport d'énergie externe. Elle est toujours due à une différence de pression, causée par le vent ou par une différence

de température (Liébard, 2006). Il existe différents procédés pour la mise en œuvre d'une ventilation naturelle tel que (Bahrami, 2008)

- ***Ventilation unilatérale***

La ventilation unilatérale est définie comme une condition dans laquelle l'air extérieur entrant d'un côté par les fenêtres circule dans le bâtiment puis ressort par une ou plusieurs ouvertures situées sur une seule façade de la pièce.

- ***Ventilation traversante***

La ventilation traversante est réalisée à travers des ouvertures situées des deux côtés du bâtiment grâce aux fluctuations de pression du vent sur les façades. En raison d'un important différentiel de pression crée par l'existence de plusieurs ouvertures, la ventilation naturelle traversante est plus performante que la ventilation unilatérale.

- ***Ventilation de cheminée***

La ventilation par cheminée est assurée par l'utilisation d'un puit central avec ouverture en hauteur permettant à l'air de circuler sans obstacles. Ce principe rend cette stratégie de ventilation plus performante et permet d'améliorer la ventilation naturelle dans un bâtiment à faibles proportions d'ouvertures latérales.

I.6.1.5. Le refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation réduit la température de l'air intérieur en évaporant de l'eau. En contact de l'eau, l'air chaud est refroidi tout en transférant sa chaleur à l'eau qui par conséquent s'évapore. (Bahrami, 2008).

I.6.1.6. L'isolation thermique

L'isolation des bâtiments est conçue pour créer une enveloppe autour du bâtiment afin de maintenir les occupants à une température confortable sans consommer de grandes quantités d'énergie. En effet, cette technique permet de réduire la consommation d'énergie, soit pour le chauffage ou la climatisation. Le dispositif d'isolation d'un bâtiment peut être réalisé intérieurement ou extérieurement de l'enveloppe. (Rahmouni, 2020).

I.6.1.7. Les fenêtres

Le système de fenestration est un élément important dans la stratégie de conception passive car il représente une part significative du gain de chaleur dans un bâtiment. L'orientation de la fenêtre et le rapport de surface fenêtre-mur sont des paramètres importants pour assurer un compromis entre le confort des occupants et la demande en énergie. Outre ces deux éléments, rapport WWR et orientation, la performance du système de fenêtres est influencée par le matériau constituant. (Zekraoui (2017)).

I.6.1.8. La protection solaire

La protection solaire désigne un ou plusieurs dispositifs permettant de contrôler la quantité de chaleur et de lumière admise par le soleil dans un bâtiment et de l'empêcher d'y pénétrer. La protection solaire peut être assurée par des dispositifs conçus de différentes manières. Les éléments en surplomb, les auvents et les stores et les panneaux d'ombrage légers et ventilés sont utilisés afin de bloquer le rayonnement solaire en été et le laisser atteindre le bâtiment en hiver



Figure I.2: Protection solaire des fenêtres (source : Trust. <www.trustaluver.com>)

I.6.1.9. L'étanchéité à l'air

L'étanchéité à l'air est la capacité d'une paroi à résister aux fuites d'air provenant de l'extérieur d'accéder à l'intérieur par des points de fuite dans l'enveloppe du bâtiment. Cette propriété est quantifiée par un taux de changement d'air par heure, ACH (*Air Change Rate per Hour*).

I.6.1.10. Le solaire passif

Le chauffage et le refroidissement d'un bâtiment grâce à l'énergie solaire sont connus sous le nom de conception solaire passive. Dans cette stratégie, les fenêtres, par exemple, sont positionnées de manière à maximiser le gain de chaleur en hiver, tandis que des dispositifs d'ombrage servent à maximiser le gain de chaleur en été. Il existe deux grands types de systèmes de chauffage solaire passif : les systèmes à gain direct et les systèmes à gain indirect.

- *Les systèmes passifs à gain direct*

Dans cette méthode de construction, le sol et les murs sont chauffés directement par les rayons du soleil, qui pénètrent dans le bâtiment par les larges parties vitrées orientées vers le sud. Cependant, dès que la lumière directe du soleil pénètre dans le bâtiment, le potentiel de chaleur et d'éblouissement existe, et il est impératif de prendre des mesures adéquates pour résoudre ces problèmes.

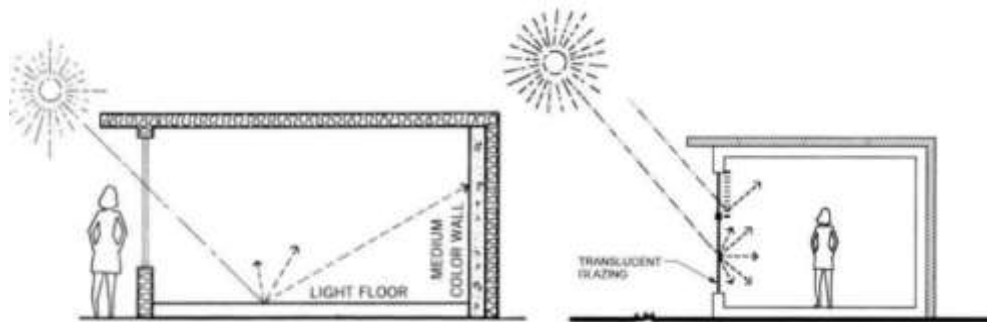


Figure I.3 : Gains solaires directs (à gauche : plancher non-massif de couleur claire, à droite : rayonnement diffus) (source : Lechner N, 2001)

- *Les systèmes passifs à gain indirect*

Dans cette disposition particulière, la masse de stockage est située dans la zone qui se trouve entre la fenêtre qui donne sur le sud et l'intérieur.

I.6.2. Stratégies de conception active

Les stratégies qui utilisent des ressources externes, comme l'énergie électrique et le gaz naturel, sont connues sous le nom de stratégies de conception active. D'autres composants qui ont besoin d'énergie pour fonctionner, comme les panneaux solaires et les éoliennes sont considérés comme des systèmes actifs.

I.6.2.1. Systèmes HVAC

Les systèmes HVAC sont des systèmes mécaniques qui assurent le chauffage, la ventilation et la climatisation (HVAC) dans un espace. Pour optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment et réduire la demande en énergie, les systèmes HVAC doivent pouvoir s'adapter à diverses circonstances extérieures et intérieures.

I.6.2.2. Énergie électrique solaire

La production de l'énergie électrique solaire se fait à partir de panneaux photovoltaïques. Pour assurer une exposition optimale et collecter le maximum d'énergie solaire, ces modules sont munis de dispositifs de suivi capables de suivre la course du soleil. (sustainable.to)

I.6.2.3. Énergie thermique solaire

La production de l'énergie thermique solaire est assurée par des dispositifs placés sur le toit du bâtiment qui vont capter l'énergie solaire pour la transformer en énergie thermique.

I.6.2.4. Énergie éolienne

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est le plus souvent réalisée à l'aide de turbines éoliennes qui récoltent l'énergie du vent pour la transformer en électricité.

I.7. Bâtiments publics et paramètres d'efficacité énergétique

Selon une estimation globale fournie par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), une part importante de la consommation d'énergie d'un pays peut être attribuée à la construction de bâtiments dans les secteurs tertiaire et résidentiel. En raison de l'augmentation constante de la demande énergétique dans les immeubles de bureaux, la prise des bonnes décisions en phase de conception devient un impératif pour garantir le bon fonctionnement du bâtiment fini.

I.7.1. Utilisation de l'énergie dans les bâtiments de bureaux

En raison des besoins croissants en énergie pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments est en augmentation ces dernières années (Baird et al., 1984). Le chauffage, la climatisation et l'éclairage représentent la majorité de l'énergie utilisée dans les immeubles de bureaux, ce qui constitue une source importante et croissante de consommation d'énergie (Nguyen et al., 2013).

I.7.2. Paramètres affectant l'efficacité énergétique

La quantité d'énergie qu'un bâtiment utilise est principalement déterminée par sa conception, qui est la principale responsable de la quantité excessive d'énergie qu'un bâtiment utilise lorsque la conception est précipitée ou inadéquate. Le taux de consommation d'énergie des systèmes consommateurs d'énergie peut être affecté par un certain nombre de facteurs, notamment le climat, l'architecture du bâtiment, l'occupation, la gestion de l'énergie et la présence ou l'absence de restrictions et de réglementations.

I.7.2.1. Les systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (HVAC)

Selon Abdul Hamid et al., (2017), cité par Ismail (2019), les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC), qui se composent principalement d'équipements à forte intensité énergétique sont les plus consommateurs d'énergie dans un bâtiment. Selon Leonidaki, (2015) les études menées par M. Fasiuddin et al, (2011), ont permis de réaliser une économie d'énergie de 25 % dans les bâtiments commerciaux en combinant un certain nombre de stratégies de fonctionnement des systèmes HVAC.

I.7.2.2. L'éclairage

L'éclairage est un élément essentiel de la conception d'un bâtiment pour garantir que l'espace de travail est confortable et propice à la productivité. Selon les résultats des recherches menées par Williams et al. (2012), diverses stratégies de gestion de l'éclairage peuvent contribuer de manière significative à la réduction des coûts. Ces stratégies comprennent, entre autres solutions, l'amélioration de la technologie des lampes, les caractéristiques des fenêtres et des dispositifs de protection solaire.

I.7.2.3. Les équipements de bureau

Les équipements de bureau, qui font également partie charges consommatrices d'électricité qui ne sont pas liées aux utilisations finales conventionnelles occupent une part importante dans la consommation d'énergie dans les bâtiments. Ils représentent environ 20 % de l'énergie primaire, (Ismail et al., 2019).

I.7.2.4. Le comportement des occupants

L'activité des occupants est un des modèles de consommation d'énergie les plus imprévisibles, ce qui rend la quantification et l'évaluation difficiles pour les chercheurs en raison des disparités entre les prévisions et les performances énergétiques réelles du bâtiment (Ismail et al., 2019).

I.7.2.5. La situation et la configuration du bâtiment

La quantité d'énergie qu'une structure utilise est considérablement affectée non seulement par sa localisation mais aussi par la conception et la configuration du bâtiment en question. De plus, l'orientation appropriée des fenêtres permet de limiter l'utilisation de l'éclairage artificiel et de favoriser l'utilisation de la ventilation naturelle, ce qui se peut se traduire par une réduction de la consommation d'énergie du bâtiment.

I.7.3. Situation de la consommation énergétique des bâtiments de bureau en Algérie

Une réduction considérable de la consommation totale d'énergie au niveau national est possible par la mise en œuvre de programmes d'efficacité énergétique dans les industries qui utilisent le plus d'énergie.

Selon le bilan énergétique 2019 (APRUE, 2019), le secteur du bâtiment Algérien représente environ 43% de la consommation totale d'énergie. Cette énorme quantité de consommation d'énergie a souligné la nécessité de mettre en place des politiques plus efficaces sur le plan énergétique afin de réduire cette forte consommation (T. Moussaoui, APRUE, 2019).

I.7.3.1. Consommation énergétique primaire en Algérie

- **Production d'énergie primaire**

Selon le bilan énergétique national (2019) établi par le ministère de l'énergie et des mines, la production commerciale d'énergie primaire a diminué de -4,8 % par rapport aux niveaux de 2018, atteignant 157,4 M tep, tous les produits, à l'exception de l'électricité, étant à l'origine de cette baisse, comme indiqué ci-dessous : (Bilan national, MEM 2019)

Tableau I.1 : Production national d'énergie primaire (source_energy.gov.dz)

Produit	Unités	2018	2019	Evolution	
				Quantité	(%)
Gaz naturel	K Tep	92 106	85 380	-6 726	-7,3
	10 ⁶ m ³	97 467	90 349		
Pétrole brut	K Tep	53 592	53 579	-213	-0,4
	K Tonnes	48 588	48 394		
Condensat	K Tep	9 990	9 226	-763	-7,6
	K Tonnes	8 825	8 151		
GPL aux champs	K Tep	9 343	9 186	-157	-1,7
	K Tonnes	7 918	7 785		
Electricité primaire	K Tep	188	192	5	2,4
	GWh	783	835		
Combustibles solides:	K Tep	22	10	-12	-53,5
	Bois	10 ³ m ³	113	53	
TOTAL	K Tep	145 241	157 374	-7 867	-4,8

La production d'électricité primaire est ainsi augmentée de 783 à 835 GWh en 2019, portée par une augmentation (+30%) de la production hydraulique suite à une pluviométrie favorable en 2019, où le total de la production a été de 152 GWh contre 117 GWh en 2018.

• **Consommation énergétique primaire**

Le gaz naturel et le pétrole représentent la quasi-totalité de la consommation totale d'énergie primaire de l'Algérie, et jusqu'à présent 3.39% seulement de la puissance installée de l'énergie est issue de sources renouvelables ; hydraulique et solaire.

Les chiffres clés de l'APRUE indiquent une consommation d'énergie primaire atteignant 60 millions de Tep. (APRUE, 20119).

- Capacité de traitement du pétrole brut de BRI et de condensat : 25.5MT/an ; 0.24MT/an ; 4.8MT/an
- Capacité de production des raffineries : 30 Millions T/an
- Capacité de production de la pétrochimie : 118 Milliers T/an
- Capacité de séparation des GPL : 8.6 Millions T/an
- Capacité de production du GN : 130 Milliards Sm³/an
- Capacité de liquéfaction des GNL : 26.8 Millions Nm³/an
- Capacité de production des centrales électriques : 13558MW
- TV: 2435 MW; TG: 5975 MW; Independents: 5148 MW

Les figures (I.4 et I.5) présentent la répartition de la consommation primaire du secteur de l'énergie par activité et par produit.

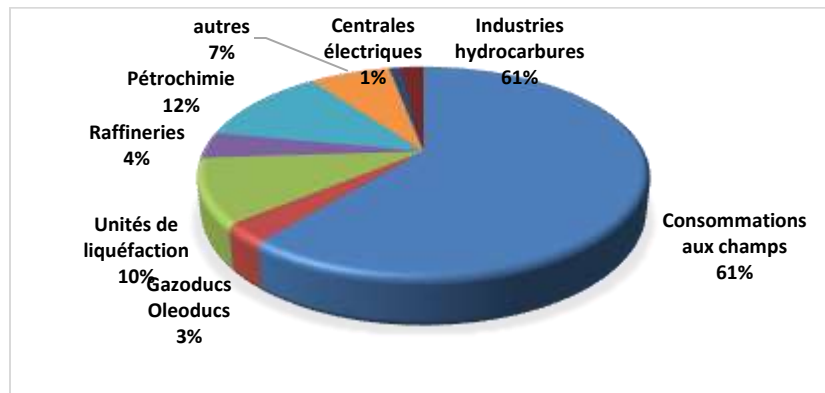


Figure I.4. Répartition de la consommation du secteur de l'énergie par activité source_ APRUE, 2019)

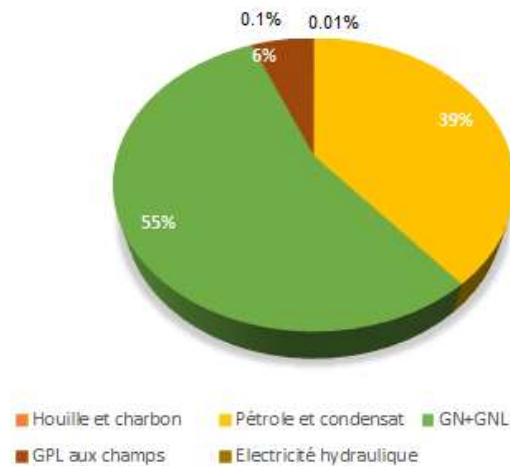


Figure I.5. Répartition de la consommation du secteur de l'énergie par produit (source APRUE, 2019)

La figure (I.6) montre une large domination du gaz naturel dans la consommation nationale totale atteignant 42 Milliards de m³ en 2017 contre 26 Milliards de m³ en 2010. Soit un TCAM de %7/an. (APRUE, 2019)

- **Consommation énergétique finale en Algérie**

- *Consommation par secteurs et par formes*

Selon le bilan énergétique national, la consommation d'énergie finale a atteint 44,65 millions de TEP. Quelques indicateurs et données utiles fournies par l'agence APRUE sont données comme suit : (APRUE, 2019)

- La population résidente : 42.2 Millions d'habitants.
 - La superficie : 741 381 2 Km²
 - Le Produit Intérieur Brut National (PIB) : 167.6 Milliards de \$
 - La consommation moyenne : 1,058 TEP/hab
 - Les émissions totales dues à l'énergie primaire consommées sont estimées à 160 Millions de Tonnes de CO₂ ; Soit environ 3 TeqCO₂/TEP.
 - L'intensité énergétique finale : 7.037 TEP/MDA2000
 - L'intensité énergétique primaire : 8.133 TEP/MDA2000
 - L'intensité environnementale finale : 15 TCO₂/MDA2000
 - L'intensité environnementale primaire : 24 TCO₂/MDA20 0
 - La Consommation finale moyenne : 1.058 TEP/hab
 - La Consommation primaire moyenne : 1.422 TEP/hab
 - L'Emission finale moyenne : 2.263 TCO₂/hab
 - L'Emission primaire moyenne : 3.812 TCO₂/hab

- **Evolution des consommations par secteur et par produit** (APRUE, 2019)

Les figures (I.6, I.7 et I.8) présentent la répartition de la consommation finale forme d'énergie et par secteur et l'historique de consommation d'énergie en Algérie (2009-2019).

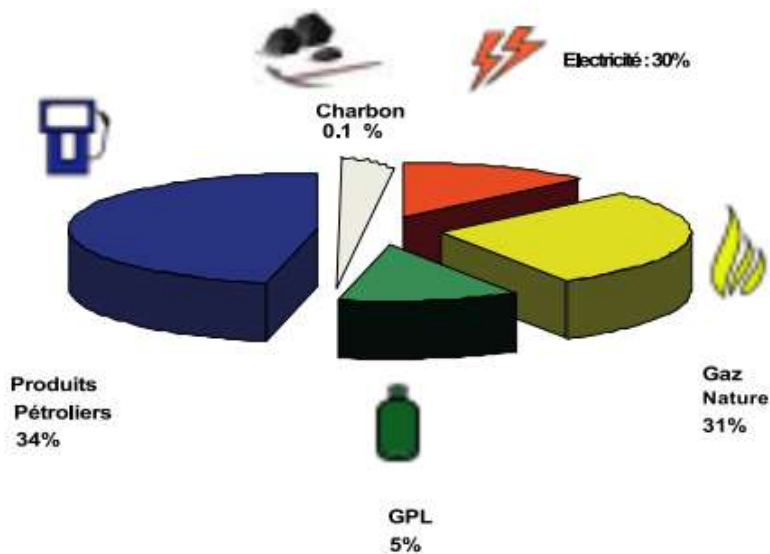


Figure I.6. Répartition de la consommation finale par forme d'énergie (source APRUE, 2019)

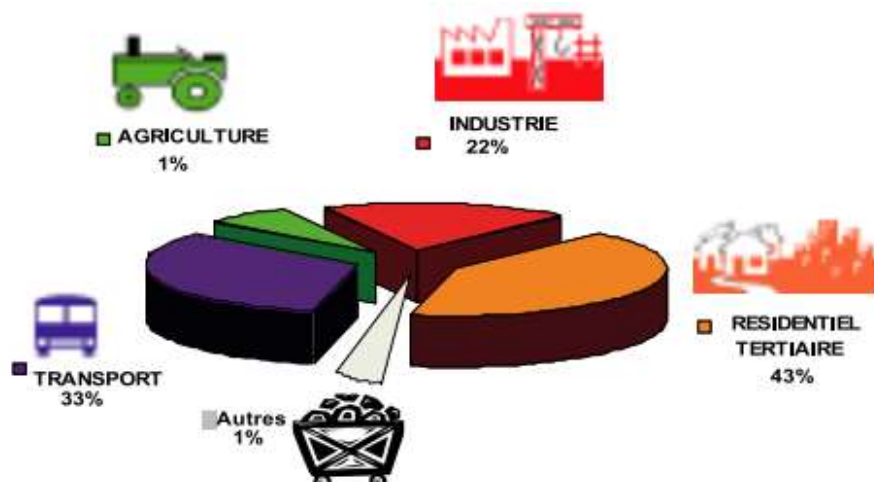


Figure I.7. Répartition de la consommation finale par secteur d'activité (source APRUE, 2019)

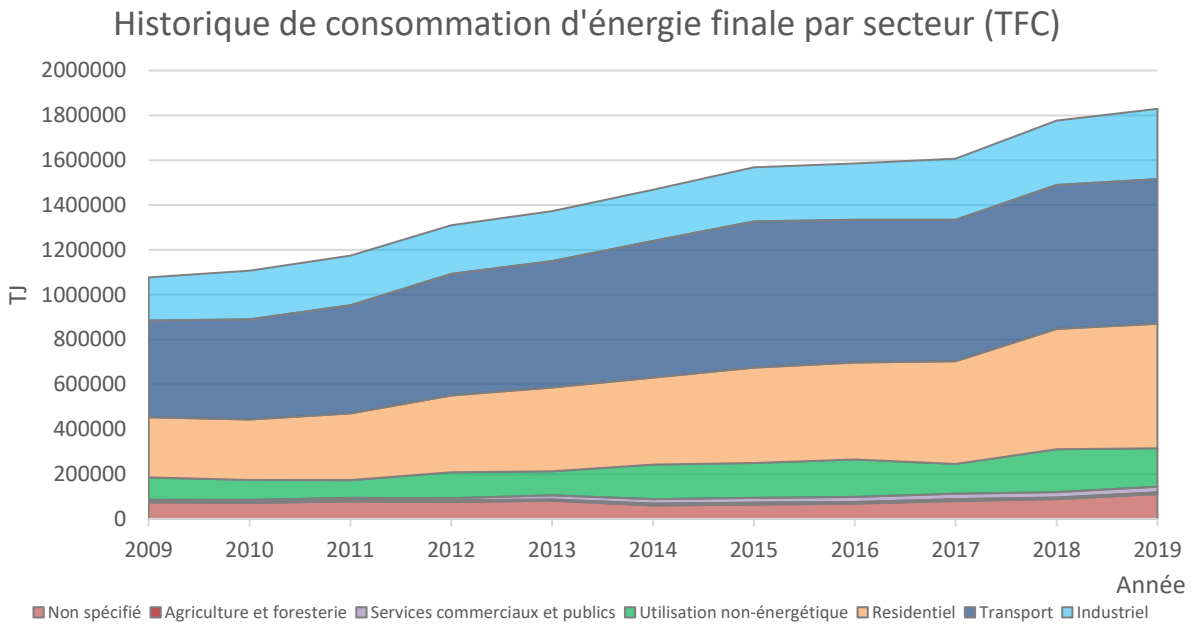


Figure I.8 : Evolution de la consommation d'énergie en Algérie (source _AIE)

• **L'énergie dans le tertiaire** (APRUE, 2019)

La consommation finale du secteur tertiaire a atteint 4 millions de TEP/pcs soit 2,5 millions de TEP/pci

Par branche, le nombre d'infrastructures par activités se répartie comme suit :

- Commerces : 544201 ;
- Administrations centrales : 26631 ;
- Tourisme : 49000 ;
- Communication : 12065 ; Education : 3950 ;
- Finances : 320 ;
- Santé : 10390 ;
- Agences immobilières : 9717 ;
- Auxiliaire de transport : 123623.

Les figures (I.9 et I.10) montrent la répartition de la consommation du secteur tertiaire par type d'énergie et par branche en Algérie.

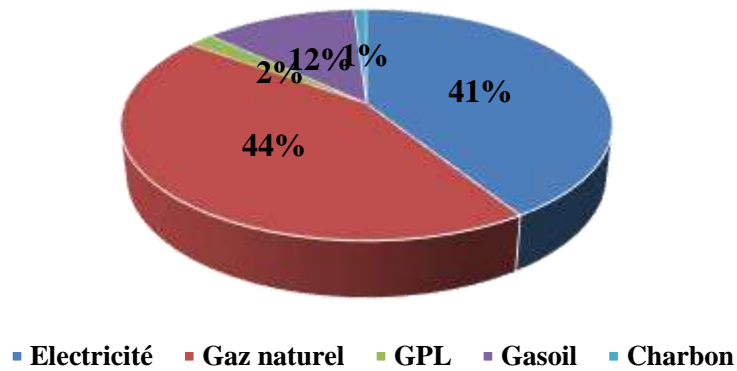


Figure I.9. Répartition de la consommation du secteur tertiaire par type d'énergie (source_APRUE)

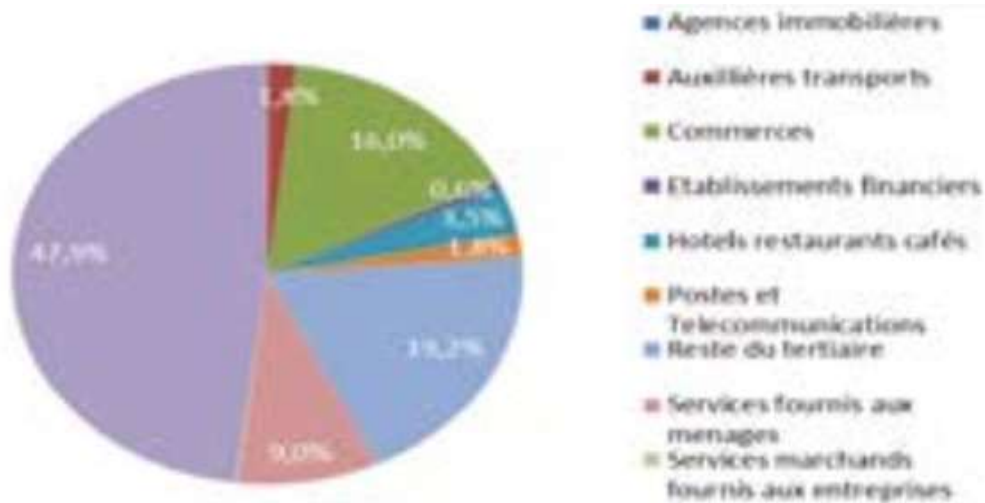


Figure I.10. Répartition de la consommation du secteur tertiaire par branche (source_APRUE)

La consommation électrique dans le secteur tertiaire représente un taux de 41% de la consommation totale d'électricité, quant à la consommation en produits gazeux, elle enregistre un taux de 69% de la consommation totale des produits gazeux.

Entre 2007 et 2017, la consommation finale du secteur a progressé annuellement de %6.6/an. L'électricité, le gaz naturel, le GPL, le gasoil, le charbon sont les produits qui ont contribué à cette évolution avec des TCAM respectifs de : %6.3- ; %5.1 ; %0.9 ; %10.3 ; %5.3/an.

La répartition de la consommation du tertiaire par produit montre que l'électricité est prédominante. Cela s'explique par l'introduction massive des équipements de chauffage et de climatisation et la généralisation de l'utilisation des matériels bureautiques et informatiques (APRUE, 2019).

I.7.3.2. Emissions CO2

L'Algérie est le troisième plus grand émetteur de CO2 en Afrique. La consommation d'énergie par habitant en 2014 était de 1 327 kg équivalent pétrole, ce qui est plus élevé que dans les autres États du Maghreb (Banque mondiale, 2014). Les transports ont représenté 32 % des émissions de CO2 en 2018, suivis par les producteurs d'électricité et de chaleur (28 %), le secteur résidentiel (19 %) et l'industrie (9 %). En raison de la croissance démographique, de l'expansion industrielle et des effets du changement climatique, les émissions de CO2 ont augmenté de 77 % depuis 2005. (Ersoy et al., 2021).

Les figures I.11 et I.12 présentent le profil de CO2 de l'Algérie en 2018 et les émissions de la production de chaleur et d'électricité, respectivement.

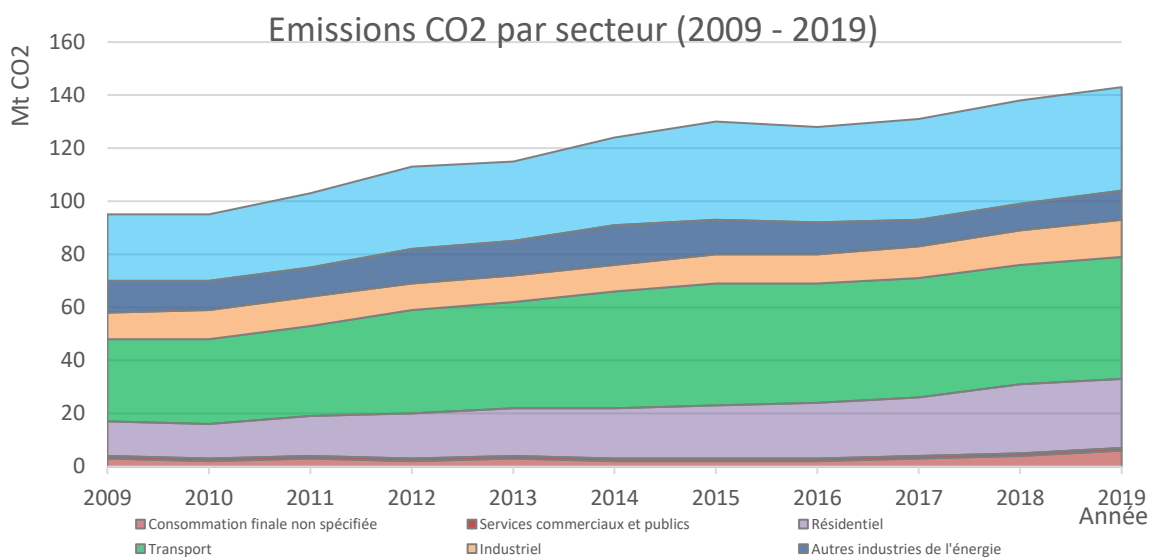


Figure I.11 : Emissions de CO2 par secteur (en Mt CO2), Algérie 2009-2019

(source : AIE, 2020)

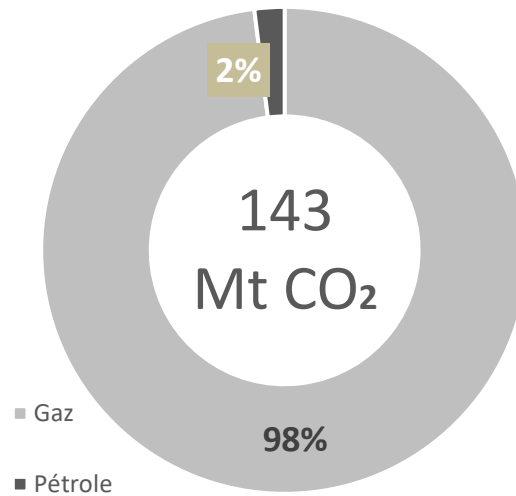


Figure I.12 : Emissions de CO2 de la production d'électricité et de chaleur par source d'énergie pour l'année 2019 (en Mt CO2), (source : données AIE, 2020 a)

I.7.4. Politiques et stratégies visant à améliorer le comportement énergétique des bâtiments en Algérie

L'Algérie est un important producteur et exportateur de pétrole et de gaz. En 2015, le pays a modifié sa stratégie de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030, en mettant l'accent sur le développement des énergies renouvelables à grande échelle grâce à de nombreuses actions incitatives. Les pouvoirs publics ont adopté des mesures constituant une politique énergétique articulée autour de plusieurs vecteurs, tels que (Bouamama, 2013).

L'APRUE : l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie est une institution publique à caractère industrielle et commerciale dont le rôle principal est le développement, la mise en œuvre et le suivi des programmes nationaux d'efficacité énergétique. L'agence a élaboré le Programme national de maîtrise de l'énergie (PNME, 2007-2011), qui constitue le cadre d'exercice de la politique algérienne d'efficacité énergétique.

- **Textes et lois**

- La loi 09-99 du 28 juillet 1999 considéré comme une loi cadre relative à la maîtrise d'énergie, son rôle est d'assurer un des objectifs fondamentaux de la politique énergétique en Algérie.
- Le décret exécutif n°2000-90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique des bâtiments neufs à usage d'habitation.
- La loi 04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- Le décret exécutif 04- 149 du 19 Mai 2004 fixant les modalités d'élaboration du programme national de la maîtrise d'énergie.
- Le Décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005 fixant les règles spécifiques d'efficacité énergétique applicables aux appareils fonctionnant à l'électricité, au gaz et aux produits pétroliers.
- Arrêté interministériel du 29 Novembre 2008 qui définit la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique.

- **Régulation thermique de la construction de bâtiments nouveaux et existants**

Plusieurs dispositifs réglementaires en rapport à l'efficacité énergétique dans l'habitat sont élaborés avec la mise en place des Documents techniques réglementaires (DTR)

- *DTR. C 3.2* : Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, règles de calcul des déperditions calorifiques
- *DTR. C 3.4* : Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments "Climatisation"
- *DTR. C 3.31* : Règles prenant en charge la ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation.

- **Programme national d'efficacité énergétique**

Pour la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment, L'Algérie a adopté en février 2011, le programme national de l'efficacité énergétique (PNEE) via l'APRUE afin d'agir sur le secteur de la construction et du bâtiment et réduire l'augmentation de la consommation énergétique. A travers ce programme, l'Algérie espère économiser jusqu'à 63 millions de TEP à l'horizon 2030-2035.

- ***Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME).***

Le fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME) a pour objet de contribuer à l'impulsion et au développement, à terme, d'un marché de l'efficacité énergétique à travers le financement des actions et projets qui interviennent dans le cadre du programme national de maîtrise de l'énergie.

- ***Comité intersectoriel de la maîtrise de l'énergie (CIME).***

Ce comité est chargé d'organiser la concertation et le développement des partenariats public/privé et émettre des avis sur des questions liées à l'évolution de la politique de maîtrise de l'énergie et des moyens qui lui sont consacrés.

I.8 Conclusion

L'efficacité énergétique des bâtiments est présentée comme un facteur très important qui contribue à la réduction de l'énergie primaire globale. La réalisation de ce concept nécessite une connaissance approfondie des différentes stratégies actives et passives impliquées dans les différents composants du bâtiment. Dans le présent chapitre, le concept d'efficacité énergétique et ses différentes stratégies d'application dans les bâtiments ont été passés en revue. Un aperçu général des réglementations et de directives du gouvernement algérien en matière de construction de bâtiments et d'efficacité énergétique des structures a également été présenté. Il en ressort que l'efficacité énergétique des bâtiments neufs et rénovés nécessite non seulement une connaissance spécifique du comportement énergétique du parc immobilier, mais s'appuie également sur des codes et des normes de construction spécifiques à la région. Ses effets peuvent être atténués par l'utilisation de solutions de conception actives et passives, ainsi que par la gestion des opérations du bâtiment et du comportement des occupants.

Chapitre II

Forme, matérialité pour des façades performantes sous climats chauds et arides

CHAPITRE II. Forme et matérialité pour des façades performantes sous climats chauds et arides

II.1. Introduction

Le climat joue un rôle crucial dans l'utilisation des combustibles fossiles. En outre, les émissions de gaz à effet de serre (GES), principalement le dioxyde de carbone (CO₂) issu de la combustion des énergies fossiles, sont la principale cause du changement climatique. L'efficacité énergétique a fait l'objet d'une grande attention et a été utilisée comme un outil d'atténuation des émissions de carbone, mais elle peut également jouer un rôle important dans l'adaptation au climat. De la même manière que l'efficacité énergétique, les programmes d'économie d'énergie peuvent également donner de la valeur à l'adaptation climatique à faible coût.

Considérant que les façades représentent avec la toiture le lieu des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, elles peuvent être considérées comme des modulateurs thermiques influant aussi bien sur le comportement thermique de la construction que sur sa performance énergétique. Le présent chapitre met en exergue les critères qui permettent de caractériser la façade et définit les principaux facteurs qui déterminent sa performance climatique. Mais avant cela, il donne une vue d'ensemble des facteurs climatiques caractérisant les régions chaudes et sèches dans le monde et en Algérie et suggère les stratégies de conception adaptées à un tel climat.

II.2. Adaptabilité du bâtiment au contexte chaud et aride

L'impact du changement climatique sur les bâtiments ne fait aucun doute. À mesure que le climat change à l'échelle mondiale et locale, l'environnement bâti sera soumis à une exposition climatique différente de celle du passé.

Les bâtiments situés dans des climats chauds et arides sont les plus sensibles au changement climatique. Les besoins en énergie peuvent connaître une augmentation nette, et l'impact dépendra largement de la situation géographique et du type de bâtiment, et la disponibilité de la ventilation naturelle. Il ressort de tout cela que l'augmentation des températures entraînera des changements liés au climat dans la demande d'énergie et aura un impact sur la conception architecturale.

II.2.1 Adaptation des bâtiments au changement climatique

Le secteur du bâtiment est responsable d'une part importante des émissions de CO₂. Cela signifie que ce secteur est devenu un domaine prioritaire du changement climatique. En ce qui concerne l'impact lié au climat chaud et aride, des stratégies d'adaptation et d'atténuation de la consommation d'énergie associées à des mesures de développement durable doivent être adoptées.

II.3. Le climat

La définition classique du climat est la description des variables atmosphériques pertinentes en termes de leur valeur moyenne et de leur variabilité. Ces variables comprennent la température, les précipitations, la vitesse et la direction du vent. Par conséquent, le climat peut être considéré comme une compilation ou une synthèse des conditions météorologiques. Cela signifie que la description du climat dans un lieu donné doit inclure une étude des conditions moyennes, du cycle saisonnier et de la probabilité de phénomènes extrêmes tels que les fortes gelées, les tempêtes, etc.

L'Organisation météorologique mondiale (OMM), lors de la conférence de Varsovie (1935), a défini le climat comme la moyenne des conditions météorologiques pour le mois et l'année, calculée sur une période de 30 ans. Lorsque nous disons, par exemple, que le climat d'une région a des hivers froids et secs, nous nous référons à ce qui se passe normalement dans cette région pendant l'hiver. (OMM, 2022).

II.3.1. Les zones climatiques

Les climats qui règnent sur le globe sont très variés et ils sont principalement influencés par l'énergie solaire qui réchauffe les masses terrestres et aquatiques. En régions tropicales et subtropicales peuvent être divisées en de nombreuses zones climatiques différentes, mais pour des raisons pratiques, trois zones climatiques principales sont considérées :

- la zone chaude-aride, comprenant le climat désertique ou semi-désertique et le climat maritime chaud et sec
- la zone chaude-humide, comprenant le climat équatorial et le climat insulaire chaud-humide
- la zone tempérée, qui comprend le climat de mousson et la zone tropicale de montagne.

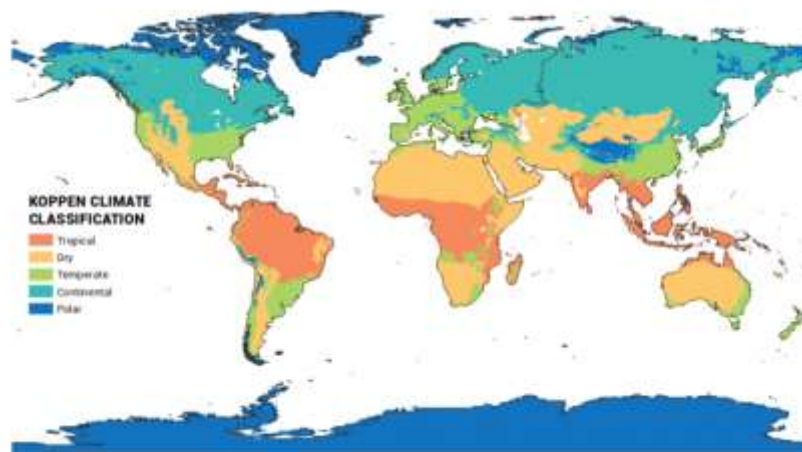


Figure II.1 . Zones climatiques mondiales (source : <https://earthhow.com/koppen-climate-classification/>)

II.3.2. Le climat chaud et aride

Le climat chaud et aride de la zone située dans deux ceintures à des latitudes comprises entre environ 15° et 30° au nord et au sud de l'équateur est caractérisé essentiellement par une saison estivale très chaude et une saison hivernale plus fraîche, ainsi qu'une grande différence de température entre le jour et la nuit. (Brahmanand, 2019).

Le climat des zones chaudes et sèches est généralement caractérisé par des températures élevées (40 à 50°C en été), avec de fortes variations de températures diurnes (jour/nuit) et saisonnières (été/hiver), et des précipitations qui sont rares, irrégulières et peu fiables. L'humidité de l'air est

faible et ce climat est généralement plus sain que celui des terres chaudes et humides. En hiver, ce climat connaît une température qui augmente rapidement après le lever du soleil jusqu'à un maximum moyen bien supérieur à 40°C, avec un maximum enregistré de 58°C, et baisse d'environ 20°C la nuit. Pendant la saison fraîche, la température maximale moyenne est d'environ 25°C, avec une baisse similaire la nuit (Gut et Ackerknecht, 1993).

En outre, Pendant le jour le ciel est clair, avec une fine couche de brume autour de la côte, ce qui permet des niveaux élevés de rayonnement solaire (Gut et Ackerknecht, 1993).

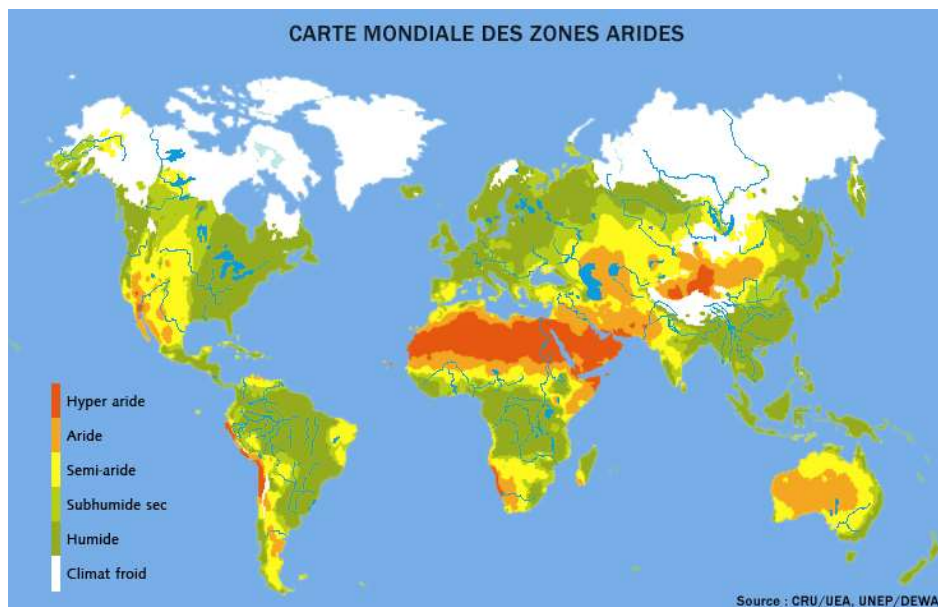


Figure II.2: Carte mondiale des zones arides (source : www.aridityworldmap.org)

Une région est qualifiée d'aride lorsqu'elle connaît un grand manque d'eau au point d'empêcher et de compromettre la croissance et le développement. Les environnements arides sont diversifiés en termes de sol, de climat, de bilan hydrique, de flore, de faune et d'activités humaines, et il n'existe donc aucune définition pratique pour définir une région aride autre que l'aridité.

II.3.3. Caractéristiques d'un climat chaud et aride

Un climat aride est connu pour être chaud et sec. Environ un tiers de la terre est couvert par un climat aride, dont la plupart se situent à 30 degrés au nord et au sud de l'équateur (World Atlas).

II.3.3.1. Faibles précipitations

La majorité des régions arides reçoivent moins de 200 millimètres de précipitations par an. Dans une région aride, les précipitations sont peu fréquentes et irrégulières et se présentent généralement

sous forme d'orage. Le sol étant sec et compact, il est impossible d'absorber l'eau rapidement, ce qui entraîne à la fois des inondations soudaines et un taux d'évaporation élevé.

II.3.3.2. Températures extrêmes

Dans les régions arides, les journées sont généralement beaucoup plus chaudes que les nuits, car le sol n'est pas en mesure de retenir suffisamment la chaleur pour le faire en plus des variations extrêmes entre l'hiver et l'été. À l'exception des pôles, la température moyenne dans les régions arides peut varier entre 26°C et 35°C. (World Atlas).

II.3.3.3. Le vent

Les climats arides connaissent des conditions venteuses en raison de la rareté de la végétation qui réduit le mouvement de l'air. Les climats arides sont connus pour leurs conditions venteuses, en raison du peu de végétation qui réduit à son tour le mouvement d'air. Le vent souffle l'air humide loin du sol et des plantes, ce qui entraîne une augmentation de l'évapotranspiration. Le vent est responsable de l'érosion du sol agricole, rendant difficile la croissance de toute plante. (World Atlas).

II.3.4. Indice d'aridité et localisation des climats chauds et arides

II.3.4.1. L'indice d'aridité

L'indice d'aridité est un indicateur numérique du degré de sécheresse du climat à un endroit donné. En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, De Martonne a défini comme fonction climatologique nouvelle l'indice d'aridité du climat par le rapport :

$$IDM = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

P : Précipitations annuelle [mm]

T : Température moyenne annuelle [°C]

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température ; l'évaporation étant considérée comme une fonction linéaire de la température. Il a été ajouté 10 aux moyennes thermométriques pour éviter les valeurs négatives de l'indice.

Tableau II.1: Classification climatique selon l'indice d'aridité de De Martonne.

Valeur de I_{DM}	Climat
< 5	Aridité absolue
5 à 10	Désert (aride)
10 à 20	Semi-aride
20 à 30	Semi-humide
30 à 40	Humide
40 à 55	Humide

II.4. Le climat en Algérie

L'Algérie présente un climat de type méditerranéen, extra tropical tempéré, caractérisé par une longue période de sécheresse estivale (3 à 4 mois sur le littoral, 5 à 6 mois au niveau des hautes plaines et plus de 6 mois au niveau de l'atlas Saharien), cette caractéristique est due essentiellement à l'influence de trois paramètres conjugués : la mer, le relief et l'altitude (Benslimane et al., 2008).

L'Algérie se situe entre 18° et 38° de latitude nord et 9° de longitude ouest et 12° de longitude est (le méridien international passe à Mostaganem). Le territoire algérien est divisé en plusieurs zones climatiques, différentes les unes des autres de par les conditions climatiques. Une classification rapide des différentes zones climatiques algériennes permet de distinguer 4 grands types de climats.

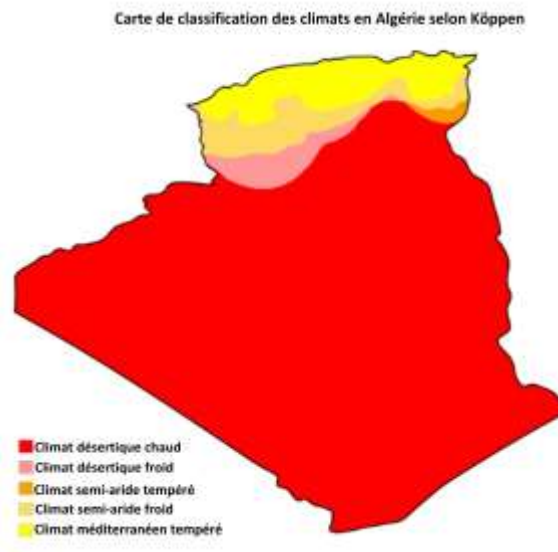


Figure II.3 : Carte des climats de l'Algérie selon la classification de Köppen, (source_Koppen)

II.4.1. Classification des zones climatiques en Algérie

L'Algérie couvre une superficie de 2.381.741 Km², dont le Sahara représente environ 87 % de la superficie globale, ce qui représente la majeure partie du territoire algérien.

Deux chaînes montagneuses importantes, l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, séparent le pays en trois types de milieux qui se distinguent par leur relief et leur morphologie : le Tell, les Hautes Plaines steppiques et le Sahara.

Plus de 85 % de la surface totale de l'Algérie est caractérisée par un climat chaud et sec, subdivisée en trois zones climatiques d'été (E3, E4 et E5) et une zone climatique d'hiver (divisée à son tour en trois sous zones H3a, H3b et H3c). Toutes ces régions subissent l'influence de l'altitude (Mokhtari, 2008). Deux grandes classes définissent la classification des zones climatiques en Algérie : des zones climatiques d'hiver et des zones climatiques d'été. A l'intérieur de chaque zone climatique, existent des sous-zones présentant des spécificités climatiques en fonction surtout de l'altitude.

II.4.1.1. Zones climatiques d'hiver

Les zones climatiques d'hiver, notées H1, H2, H3 sont déterminées selon la latitude (figure 2.2).

- La zone H3a (Présaharien), d'altitude comprise entre 500 et 1000 mètres, est caractérisée par des hivers très froids la nuit par rapport au jour.
- La zone H3b (Sahara), d'altitude comprise entre 200 et 500 mètres, les hivers y sont moins froids que ceux de la zone H3a.
- La zone H3c (Hoggar), d'altitude supérieure à 500 mètres, avec des hivers rigoureux analogues à ceux de la zone H3a.

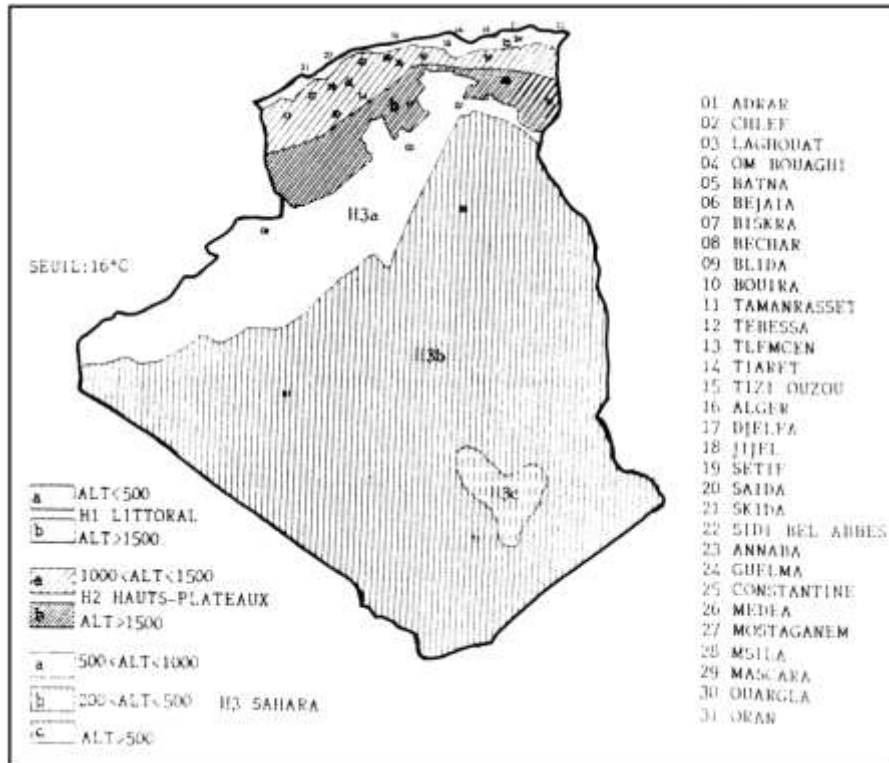


Figure II.4 : Carte des zones climatiques d'hiver (source_Mokhtari, 2008)

II.4.1.2. Zones climatiques d'été

Les zones climatiques d'été sont notées E1, E2, E3, E4 et E5. Les trois premières zones subissent respectivement l'influence de la mer et celle de l'altitude, tandis que les zones E4 et E5 subissent l'influence de la latitude (Mokhtari, 2008)

- La zone E1 est caractérisée par des étés chauds et humides,
- La zone E2 connaît des étés assez chauds et moins humides avec des écarts de températures importants pendant la journée.
- La zone E3 (Présaharien et Tassili), avec des étés très chauds et très secs
- La zone E4 (Sahara) est caractérisée par des étés plus secs et plus chaud que la zone E3.
- La zone E5 (Tanezrouft) est la zone la plus chaude en Algérie.

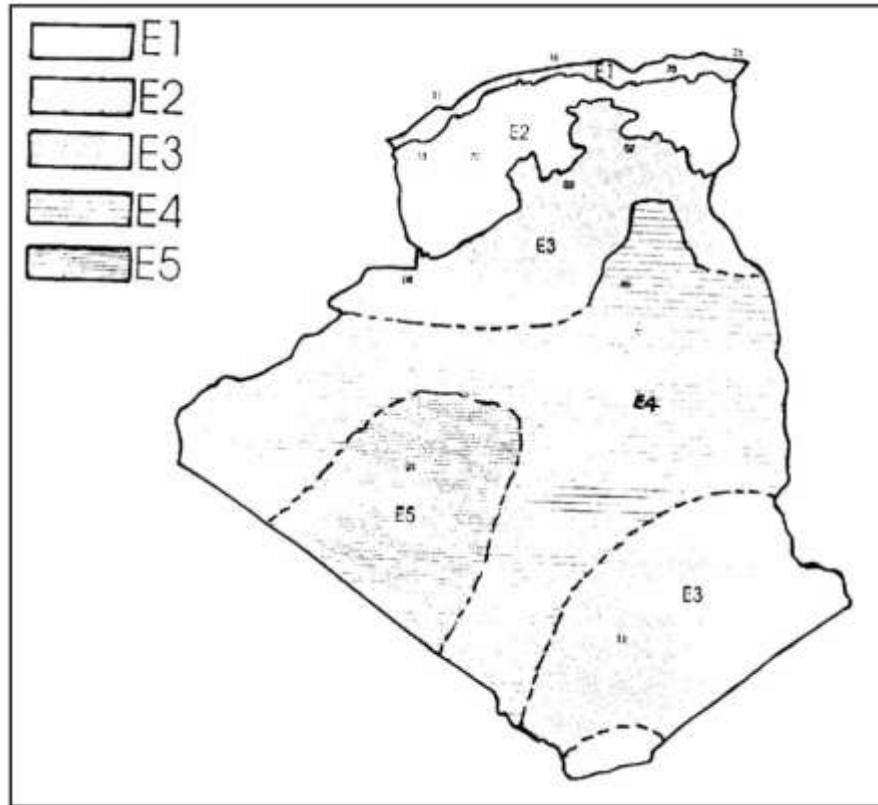


Figure II.5: Carte des zones climatiques d'été (Mokhtari, 2008)

II.5. Conception dans les zones chaudes et arides : Principes de base

L'objectif principal de la conception climatique est de rendre un bâtiment aussi économe en énergie que possible tout en maintenant un climat intérieur confortable. Les climats arides nécessitent de minimiser l'exposition aux rayons directs et réfléchis du soleil, tout en gérant les variations de température entre l'été et l'hiver.

II.5.1. Formes urbaines et espaces extérieurs

Les groupes de bâtiments doivent être construits de manière à ce qu'ils se fassent mutuellement de l'ombre. L'utilisation de teintes plus claires dans chaque espace ouvert et l'incorporation d'espaces paysagers à l'intérieur et à l'extérieur de la structure contribuent à fournir de l'ombre et de l'air frais. (source : Gut et Ackerknecht, 1993)

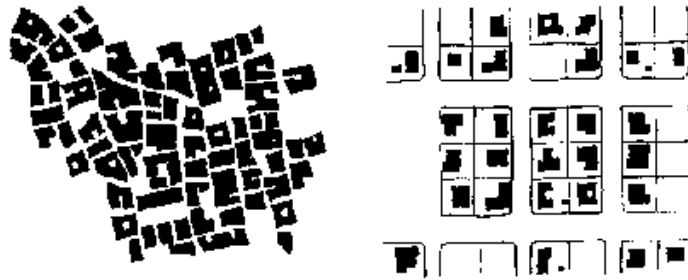


Figure II.6 : Modèles urbains traditionnels (source : Gut et Ackerknecht, 1993)

II.5.2. Orientation

La protection contre le soleil et le vent et la régulation du flux d'air peuvent être obtenues par l'ajustement et l'orientation appropriés des bâtiments. Afin de maximiser les avantages du flux d'air frais, les bâtiments doivent être situés sur des pentes ombragées et correctement orientés pour profiter de cet impact.

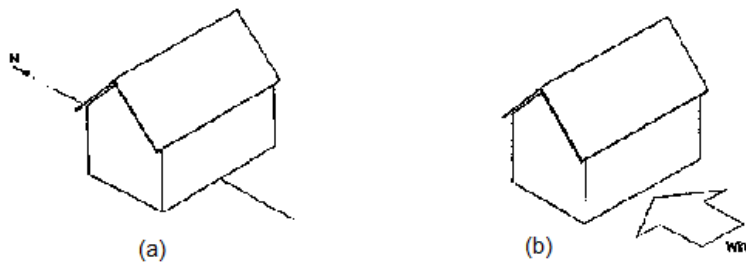


Figure II.7 : Orientation optimale (a) concernant les gains de chaleur - nord et sud ; (b) concernant la ventilation - face au vent. (source : Gut et Ackerknecht, 1993)

II.5.3 Forme et volume

La forme et le volume des bâtiments doivent être compacts. En général, la meilleure forme est celle qui minimise le gain de chaleur en été et maximise le gain de chaleur en hiver. Dans les climats chauds et arides, le rayonnement solaire, l'éblouissement et les vents chauds doivent être maintenus à l'écart des espaces extérieurs et intérieurs (Gut et Ackerknecht, 1993)

II.5.4. Murs et matériaux

Les qualités d'un mur doivent être choisies en fonction des fonctions primaires qu'il remplit. Les murs en pierre et en brique sont des matériaux adaptés aux endroits chauds et secs. L'isolation

entre les deux murs d'une double paroi est nécessaire pour réduire les fluctuations de température en surface, mais elle doit être associée à des moyens de ventilation et de refroidissement adéquats. Dans les régions où les écarts de température diurnes sont importants, les toits doivent être construits avec des matériaux à haute capacité thermique pour atténuer les fluctuations de température. (Gut et Ackerknecht, 1993).

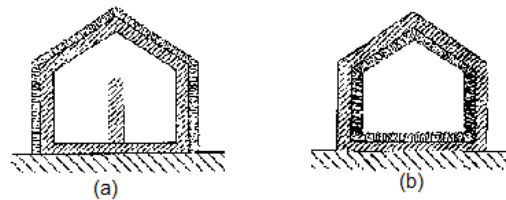


Figure II.8. Emplacement de l'isolant (a) efficace : la masse de stockage est à l'intérieur de l'isolation; (b) inefficace : l'isolation sépare la masse de stockage de l'intérieur (source : Gut et Ackerknecht, 1993)

II.5.5. Ouvertures et fenêtres

Les ouvertures principales doivent se trouver sur les côtés nord et sud de la maison. Les fenêtres situées à l'ouest et à l'est doivent être petites pour empêcher la chaleur d'entrer. Celles-ci doivent être protégées par des dispositifs de protection solaire. Les fenêtres et autres ouvertures doivent être placées dans des positions appropriées par rapport au vent dominant pour permettre un flux d'air naturel à travers le bâtiment. (Gut et Ackerknecht, 1993)

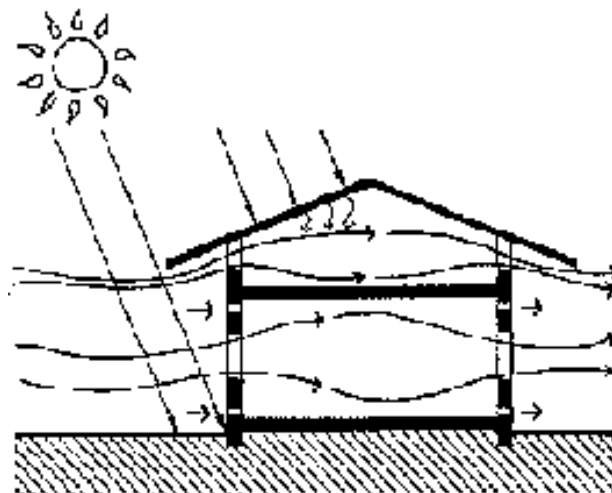


Figure II.9 : Placement des ouvertures (source : Gut et Ackerknecht, 1993)

II.5.6. Dispositifs d'ombrage

L'ombrage du rayonnement solaire direct peut être assuré par différents moyens, tels que le rapprochement des bâtiments, la forme du bâtiment lui-même ou des dispositifs spéciaux de protection solaire. En général, les éléments de protection solaire sur les façades Est et Ouest doivent être verticaux, car le soleil est bas. Sur les façades sud et nord, les éléments de protection solaire doivent être horizontaux. (Gut et Ackerknecht, 1993)

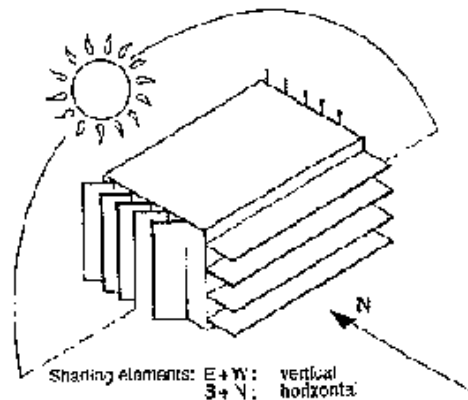


Figure II.10 : Dispositifs de protection solaire (source : Gut et Ackerknecht, 1993)

II.5.7. Couleurs

Les couleurs extérieures d'un bâtiment doivent bien réfléchir l'énergie solaire. Par ailleurs, le rayonnement hivernal est mieux absorbé lorsque les surfaces sont plus sombres et l'utilisation de couleurs intérieures vives peut être employée pour refroidir la chaleur extérieure intense et diffuser la lumière naturelle (Gut et Ackerknecht, 1993).

II.6. Architecture bioclimatique et efficacité énergétique

Il est essentiel d'intégrer l'architecture bioclimatique aux préoccupations environnementales afin de réduire la consommation d'énergie. L'architecture bioclimatique peut être définie comme une approche de la conception des bâtiments qui s'inspire de la nature et qui applique une logique de durabilité à toutes les parties d'un projet.

En comprenant le microclimat et en mettant en œuvre des méthodes de conception adéquates, les approches bioclimatiques ont pour but de créer des conditions confortables dans les bâtiments. Le choix d'une démarche de conception bioclimatique favorise les économies d'énergies et permet de réduire les dépenses de chauffage et de climatisation, tout en bénéficiant d'un cadre de vie très

agréable. Le triptyque de la figure (II.11) illustre la symbiose catégorisant les éléments clés de l'architecture bioclimatique : le bâtiment, le climat et le mode de vie.

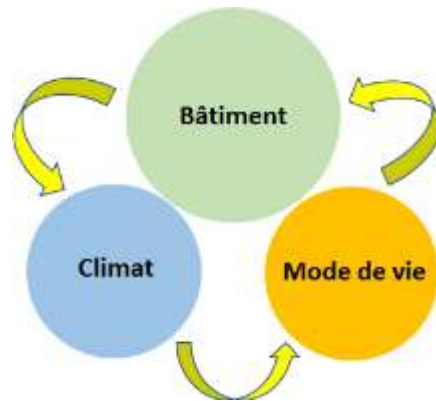


Figure II.11 : Triptyque de l'architecture bioclimatique (source : auteur)

Les objectifs de la conception bioclimatique sont, en hiver de résister aux pertes de chaleur de l'enveloppe du bâtiment et privilégier le gain de chaleur solaire, alors qu'en été les objectifs sont inversés. Les stratégies peuvent être présentées comme suit : (Watson, 2020)

- Réduire au minimum le flux de chaleur par conduction.
- Retardement du flux de chaleur périodique
- Minimiser l'infiltration.
- Fournir un stockage thermique
- Favoriser les gains solaires
- Minimiser le flux d'air extérieur.
- Promouvoir la ventilation
- Minimiser les gains solaires
- Préconiser le refroidissement par rayonnement
- Améliorer le refroidissement par évaporation

II.7. La façade entre forme et matérialité

La façade d'un bâtiment est la première couche que nous rencontrons lorsque nous évaluons la conception esthétique d'un bâtiment. Sa forme et sa composition ont des répercussions sur l'esthétique et les performances. En tant que moyen de conférer une personnalité à un bâtiment et

en tant que partie intégrante de la technologie de performance de ce dernier, les façades requièrent une attention égale (McIntosh, 2008).

II.7.1. Définition de la façade

Le mot "façade" trouve son origine dans le mot latin *facia*, qui se traduit littéralement par "visage humain". Menzel (2012) définit la façade comme la surface extérieurement visible d'une structure, à la différence du mur extérieur, qui fait référence à un élément de construction.

Du point de vue de l'échange d'énergie, la façade est ainsi définie comme : « *non seulement la surface bidimensionnelle des éléments extérieurs qui séparent l'espace conditionné de l'espace non conditionné, mais aussi un espace de transition affectant une zone semi-extérieure où l'énergie thermique peut être transférée vers ou depuis l'extérieur, vers l'espace conditionné ou non conditionné* » (ASHRAE, 1999).

II.7.2. Rôle de la façade

En tant que composant de l'enveloppe du bâtiment, la façade joue un rôle important dans le fonctionnement global du bâtiment dans son ensemble. Les façades sont considérées comme un "régulateur environnemental" thermique agissant comme une transition entre l'environnement intérieur contrôlé et l'environnement extérieur naturellement fluctuant (température, rayonnement solaire, vent, humidité). En associant les fonctions que peuvent remplir les façades, Badarnah Kadri (2012) a identifié les liens entre les exigences des occupants des bâtiments et l'environnement extérieur. Ces fonctions comprennent, entre autres, l'absorption, la redirection et la diffusion du rayonnement solaire. En outre, elles peuvent également jouer un rôle important dans les systèmes de ventilation et de contrôle de l'humidité du bâtiment. Enfin, elles réduisent la quantité de bruit provenant de l'extérieur, protégeant ainsi l'intérieur du bâtiment.

II.7.3. Classification des façades

II.7.3.1. Selon la géométrie

- *Verticale*

Ce type de façade est caractérisé par l'utilisation des formes géométriques droites claires, rigides et bien déterminées. D'après Broto (2011), dans la plupart des cas, cette forme représente la projection verticale des plans géométriques rectangulaires ou carrés.



Figure II.12: Façade verticale droite (source : <https://www.pinterest.com/vertical-facades/>)

- ***Inclinée***

Cette façade est caractérisée par une inclinaison par rapport à la verticale vers l'intérieur ou vers l'extérieur, celle-ci peut être pliée ou à surfaces polygonales.



Figure II.13 : Façade inclinée (source : biblus.accasoftware)

- ***Courbe***

Ce type de façade obéit à un axe vertical, horizontal ou doublement curviligne, comme démontré par (Herzog, 2004), les exemples de ce type de surfaces ainsi que leurs dénominations sont représentés dans la figure suivante.



Figure II.14 : la Façade courbée (source : Thomas Herzog)

- ***Mixtes***

Ce type se définit par l'emploi d'un complexe des formes géométriques précédentes sur la même façade.



Figure II.15 : La façade mixte (source : amc.archi.)

II.7.3.2. Selon la portance

En général, les façades sont classées en deux catégories en fonction de leur pouvoir porteur

- ***Porteuses***

Les façades porteuses ou lourdes sont des composants qui participent à la fonction structurale et à la stabilité du bâtiment, elles portent les charges des toitures et des planchers (Certu, 2003).

- ***Non-porteuses***

Les façades non porteuses sont des composants légers suspendus qui ne participent pas à la fonction structurelle ou la stabilité du bâtiment (Herzog et al., 2007).

II.7.3.3. Selon le matériau

Selon la catégorisation fournie par Aksamija (2013), il existe essentiellement deux types différents de façades :

- Les façades opaques sont celles qui sont principalement constituées de couches de matériaux solides, tels que la maçonnerie, la pierre, les panneaux de béton préfabriqué, le bardage métallique, l'isolation et l'ossature en acier formé à froid. Ces types de façades sont généralement construits à partir d'éléments architecturaux lourds.

- Les façades vitrées, souvent appelées murs-rideaux ou façades d'immeubles de bureaux, se caractérisent par leur composition principale en verre transparent ou translucide et par des éléments d'encadrement en métal.

Des exemples de conceptions de façades lourdes et légères, sont présentés ci-après.

- **Exemples de Façades Lourdes**

- **Façade en béton**

Ces façades peuvent faire partie de la structure du bâtiment et, dans ce cas, elles doivent être conçues pour supporter, en plus de leur propre poids, les charges de la structure principale du bâtiment.



Figure II.16 : Façade lourde en béton (source : le moniteur)

- **Façade préfabriquée**

Les façades en panneaux préfabriqués de béton sont fixées par des ancrages à la structure résistante du bâtiment. Les principaux avantages des façades en panneaux de béton sont leur durabilité, leur résistance au feu, leur isolation thermique et acoustique et leur sécurité.



Figure II.17: Façade en béton préfabriqué (source : le moniteur)

- **Façade en brique**

Ces façades sont tout simplement constitués de brique en terre cuite ou de béton qui peuvent être appliqués sur les murs extérieurs ou la façade de tout bâtiment.



Figure II.18 : Façade en brique (a) brique en terre cuite ; b) brique en béton (source : Archiexpo)

- **Exemples de Façades Légères**

- **Façade à panneaux métalliques**

Les façades métalliques peuvent être réalisées entièrement ou en tant que revêtement de façade lourd dans des bâtiments de bureaux uniques, en combinaison avec d'autres matériaux tels que le verre.



Figure II.19: Façade à panneaux métalliques (source_alucoband.com)

- **Façade en mur rideau**

Le mur-rideau est l'une des solutions les plus actuelles et les plus modernes pour les clôtures extérieures des bâtiments de bureaux. Il confère au bâtiment la philosophie générale de la transparence, et lie plus étroitement l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.



Figure II.20 : Façade en mur rideau (source : archiexpo.fr)

- **Façade vitrée**

Une façade vitrée extérieure est une sorte de mur-rideau entièrement construit en verre et constitue l'enveloppe extérieure d'un bâtiment.

a) Vitrage structurel

Dans cette solution, les différents modules de verre sont reliés par un joint structurel. L'absence de profils visibles donne au vitrage un aspect plus continu.

b) Façades photovoltaïques

Les façades photovoltaïques sont à la fois des enceintes et des générateurs d'énergie capables de produire de l'électricité en exploitant les rayons du soleil.



Figure II.21 : Façade vitrée (source : sotas SA)

- **Façade ventilée**

La façade ventilée présente, à condition d'être correctement exécutée et entretenue, des avantages indiscutables en termes d'isolation thermo-acoustique grâce à une chambre ventilée entre le bardage et l'isolant.



Figure II.22 : Façade ventilée (source : voivert.ca)

- **Façade respirante**

Les façades respirantes sont celles qui sont caractérisées par une chambre à air de dimensions très réduites, de sorte qu'il n'y a qu'une seule membrane qui égalise la pression de vapeur à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre afin d'éviter la condensation à l'intérieur de celle-ci.



Figure II.23 : Façade respirante (source : wicona.com)

- **Façade végétalisée**

Une façade recouverte de plantes grimpantes ou suspendues est appelée façade "verte". La façade végétalisée est considérée comme un système passif durable qui permet d'améliorer les ambiances thermiques et minimiser la consommation énergétique des constructions.



Figure II.26: Façade végétalisée (source_www.construction21.org)

II.8. Conclusion

Le deuxième chapitre a présenté une vue d'ensemble des pratiques constructives des façades des bâtiments en mettant l'accent sur les facteurs affectant l'énergie et les directives de conception tout en soulignant leur adaptabilité au climat chaud et sec. En effet, ce climat, caractérisé par de longs étés étouffants, des hivers froids et des vents de sable saisonniers, couvre quatre-vingt-neuf pour cent du territoire algérien. S'adaptant à de telles conditions, la conception des façades des bâtiments de bureaux doit impliquer des stratégies adéquates pour maintenir un environnement confortable pour l'utilisateur, concrétisées par le juste choix des matériaux et l'adoption de mesures de protection solaire en prédéfinissant l'orientation, la fenestration et les systèmes d'ombrage.

Chapitre III

Performances thermiques et performances
énergétiques des composants de la façade

CHAPITRE III. Comportement thermique et performance énergétique des composants de la façade

III.1. Introduction

En considérant la façade en tant qu'élément architectural pertinent du point de vue de la performance thermique et énergétique d'un bâtiment cela implique également une bonne connaissance de ses composants matériels et de leur comportement thermique. Pour mieux cerner ce sujet, le présent chapitre est consacré aux éléments opaques, vitrés et d'ombrage de la façade, en tant que paramètres déterminant son comportement thermique. Ainsi, les propriétés thermophysiques et dynamiques des parois opaques sont explorées, alors qu'un aperçu des différentes solutions d'isolation est présenté. Le chapitre s'intéresse, également, aux méthodes définissant l'inertie thermique des parois, de même qu'à l'influence de la texture de la surface et des propriétés des surfaces vitrées sur le fonctionnement thermique de la façade. Enfin, les solutions d'ombrage pour les surfaces vitrées et opaques sont explorées.

III.2. Principes d'échanges thermiques de la façade

III.2.1. Modes de transfert thermique dans le bâtiment

En hiver, lorsque le bâtiment est chauffé à l'intérieur, le flux de chaleur va de l'intérieur vers l'extérieur. En été, lorsqu'il fait plus chaud à l'extérieur, le mouvement se fait en sens inverse. Plus la chaleur circule rapidement, plus le différentiel de température est important.

III.2.2. Processus de transfert thermique dans le bâtiment

Le mouvement d'énergie d'un côté d'une paroi vers l'autre en raison d'une différence de température est appelé transfert de chaleur. Le transfert de chaleur se fait à travers l'enveloppe principalement par conduction, suivie de deux autres mécanismes qui sont la convection et le rayonnement (fig.III.1).

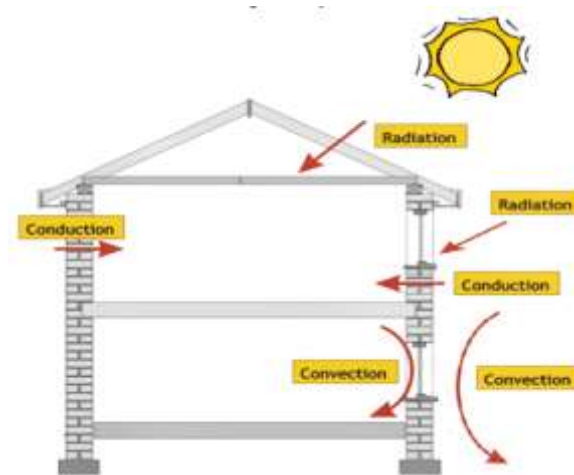


Figure III.1 : Mécanisme de transfert de chaleur dans un bâtiment (source Wasmi, T., 2016)

- **Conduction**

Le processus par lequel la chaleur traverse l'épaisseur d'un mur, du côté chaud au côté froid, est appelé transfert par *conduction*. La quantité de transfert de chaleur par conduction dépend de plusieurs paramètres, tels que l'épaisseur du mur, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe ainsi que la conductivité thermique du matériau

- **Convection**

Le transfert thermique par diffusion entre un fluide (liquide ou gaz) en mouvement et une surface est appelée convection. Ce mécanisme est important dans la conception des bâtiments pour la modération des températures internes et l'amélioration du confort.

- **Rayonnement**

Le transfert thermique d'un corps à un autre par ondes électromagnétiques et sans contact direct est appelée rayonnement. Le transfert par rayonnement de la chaleur se fait à partir de la source vers les zones froides.

III.3. Propriétés thermo-physiques des matériaux

Les paramètres essentiels d'un matériau définissant sa capacité d'absorption et de transmission de la chaleur dans l'analyse thermique sont les suivantes : (Childs et al., 1983).

- Conductivité (λ) : elle est définie comme la capacité d'un matériau à diffuser la chaleur sans déplacement de la matière. Elle est exprimée en (W/M.K). L'inverse de la conductivité est la résistivité (r).
- Densité (ρ) : c'est la masse volumique d'un matériau, exprimée en (kg/m³).
- Chaleur spécifique (c) : c'est la quantité d'énergie nécessaire pour produire un changement de température dans une masse de matériau (J/kgK).

III.3.1. Transfert thermique dans le bâtiment.

Le transfert de chaleur dans un bâtiment peut être évalué à l'aide d'études de transfert en régime permanent et transitoire. (Rodrigues, L.T 2009)

III.3.1.1. Transfert thermique en régime permanent

Le transfert de chaleur par conduction est régi par la loi de Fourier sur la conduction thermique, donnée comme suit : (Childs et al., 1983).

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

où q est le flux thermique (W/m²), λ est la conductivité thermique, et dT/dx est la différence de température le long du trajet du flux de chaleur. L'état stationnaire fait référence à une situation dans laquelle les températures ne changent pas.

- **Résistance thermique R (valeur-R)**

La performance thermique d'un bâtiment est évaluée à travers sa résistance thermique, notée ' R ' qui est fonction de l'épaisseur ' e ' et de la résistivité ' r ', soit : (Rodrigues, L.T 2009)

$$R = r \cdot e \quad (2)$$

- **Transmission thermique (valeur-U)**

La valeur U est le principal facteur qui détermine les pertes et les gains de chaleur en régime permanent. La valeur-U d'une paroi est égale à l'inverse de sa résistance thermique (R), elle est exprimée ($W/m^2.K$), et donnée par l'expression suivante : (Childs et *al.*, 1983).

$$U = \frac{1}{R} \quad (3)$$

III.3.1.2. Transfert thermique en régime transitoire

La figure (III.2) illustre parfaitement le transfert thermique en régime transitoire. La température est constante (partie a), puis elle augmente (partie b). les parties (c, d et e) montrent les différentes étapes du transit du profil de température à travers la paroi. Enfin, la phase transitoire est terminée et les conditions d'équilibre sont réunies dans la partie (f). (Childs et *al.*, 1983).

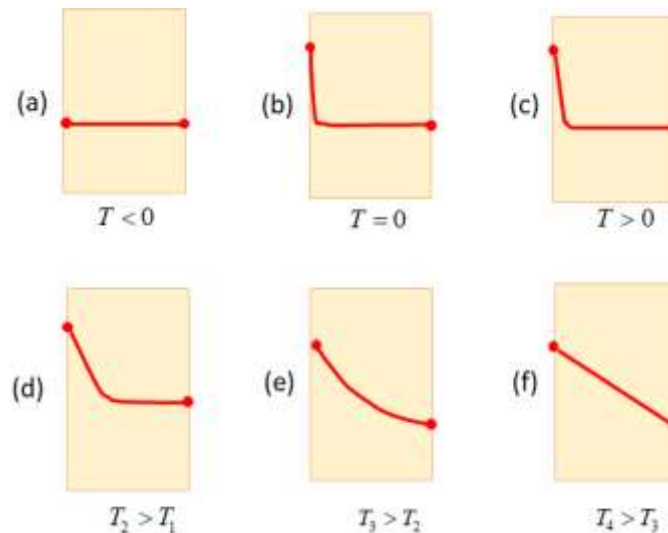


Figure III.2 : Evolution du profil de température dans une paroi suite à un changement de la température d'une surface (Childs et *al.*, 1983).

III.4. Paramètres thermiques de surfaces opaques de la façade

III.4.1. Capacité thermique

C'est la capacité d'un matériau à absorber ou à échanger thermiquement de la chaleur. Elle est déterminée par la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température du corps de 1°C. La capacité thermique d'un bâtiment est un bon indicateur de la qualité de l'isolation de ses murs.

III.4.2. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une mesure utile pour évaluer la masse thermique ; elle indique la vitesse à laquelle la chaleur se propage à travers une paroi. Elle est proportionnelle à sa conductivité. (Liébard, 2006).

La diffusivité se mesure en m²/h. (Childs et *al.*, 1983).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c} \quad (4)$$

λ = conductivité thermique (W/m.K)

ρ = densité (masse volumique) du matériau (kg/m³)

c = chaleur massique (Wh/kg.K)

III.4.3. Effusivité thermique

L'effusivité thermique désigne la capacité du matériau à absorber (ou à restituer) la chaleur. L'effusivité, exprimée en [(W/m².K)^{1/2}], est donnée par l'expression : (Liébard, 2006).

$$b = \sqrt{\lambda \times \rho \times c} \quad (5)$$

λ , ρ et c , étant définis précédemment.

III.4.4. Inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité du matériau à absorber et à stocker la chaleur pendant la journée, puis à la restituer le soir. Cette capacité permet une régulation de la température par stockage puis restitution (figure III.3).

En règle générale, l'utilisation de l'inertie thermique est un élément d'une stratégie de conception passive, qui est une approche de la conception architecturale promouvant l'économie d'énergie et l'amélioration du confort par l'utilisation de la forme et des matériaux du bâtiment. (Tasnuva, 2007)

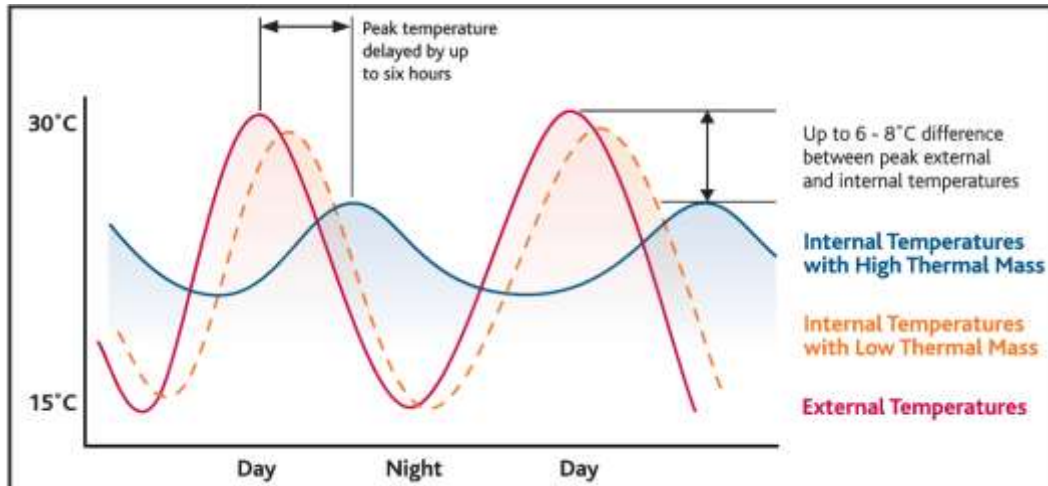


Figure III.3 : Température interne d'un bâtiment à haute et à basse inertie thermique comparée à la température externe (source : De Saulles 2012).

III.4.4.1. Influence de l'inertie thermique sur le choix des matériaux

Dans les bâtiments, certains matériaux ont une inertie thermique qui leur permet d'aspérer l'excès de chaleur en été et de minimiser les charges de refroidissement en hiver, tout en diminuant les pics de charge de chauffage. La brique, la pierre et le béton, qui sont tous des matériaux de construction lourds, présentent ces caractéristiques. Leur capacité de stockage et leur faible conductivité thermique en font des matériaux idéaux pour un large éventail d'applications. Le principe de base de l'utilisation de ces matériaux lourds est leur capacité d'absorption de la chaleur. (Tasnuva, 2007).

III.4.4.2. Mesure de l'inertie thermique

- **Admittance**

La masse thermique d'un élément de construction peut être déterminée par sa valeur d'admittance. L'admittance thermique mesure la capacité d'un matériau à absorber et à libérer la chaleur de la zone dans les cycles thermiques, et elle est exprimée en W/m^2K .

La valeur d'admittance est susceptible d'être élevée pour les structures construites avec des matériaux à forte inertie thermique, alors qu'elle est faible pour les structures faites de matériaux isolants, et cette différence peut être utilisée pour déterminer l'inertie thermique d'un bâtiment.

- **Décrément thermique**

La densité, la capacité thermique et la conductivité thermique d'un mur peuvent entraver et ralentir le transfert de chaleur d'un côté à l'autre du mur et atténuer les gains lorsqu'ils le traversent. Ce ralentissement de transfert thermique est désigné par le terme "décrément" qui est lié au concept d'inertie thermique (The Concrete Center).

- **Facteur de décrément**

Le facteur de décrémentation montré en figure (III.3a) est le rapport entre la température cyclique de la surface intérieure et celle de la surface extérieure. C'est un facteur sans dimension qui exprime mathématiquement le changement d'amplitude d'une onde thermique traversant une paroi (Verbeke et al., 2018).

- **Déphasage thermique**

Le déphasage thermique ϕ détermine le temps nécessaire à la chaleur pour traverser une épaisseur donnée d'un matériau. La longueur du déphasage évite que les gains de chaleur maximums de la surface extérieure vers la surface intérieure ne se produisent avant la nuit. (Verbeke et al. 2018). Le déphasage thermique d'une paroi est représenté graphiquement sur la figure (III.3b).

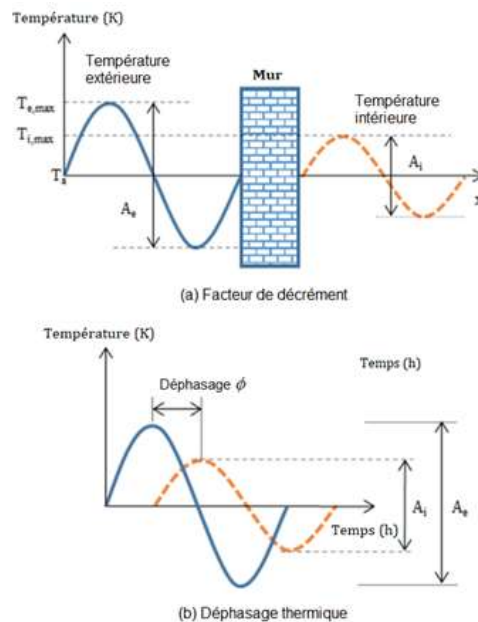


Figure III.4 : Réponse thermique à la propagation d'une onde de chaleur sinusoïdale à travers une paroi (source_ Verbeke et al. 2018)

III.5. Isolation thermique

L'isolation thermique de l'enveloppe est généralement utilisée pour réaliser des économies d'énergie, car elle permet de réduire la quantité de transfert de chaleur entre les objets en contact thermique les uns avec les autres.

III.5.1. Concept d'isolation thermique

En termes simples, l'isolation thermique a pour mission d'empêcher le transfert de chaleur de ou vers le corps isolé, tandis que cette même chaleur traverse les matériaux isolants. Ce concept est l'un des facteurs les plus importants pour la réduction de la consommation d'énergie. La laine minérale et la laine de verre sont des exemples de matériaux isolants à pores ouverts dans lesquels l'air a une mobilité très limitée, alors qu'il reste presque immobile dans les matériaux à pores fermés comme le polyuréthane ou d'autres polyuréthanes.

III.5.2. Avantages de l'isolation

Plusieurs études, citées par Kumar et al., (2020) ont porté sur les propriétés des matériaux d'isolation, notamment la conductivité thermique le stockage de l'énergie thermique, la masse thermique et l'environnement. Kumar et al., (2020) indique un certain nombre d'avantages que présente l'isolation thermique en tant que barrière au transfert de chaleur, tels que la réduction de la consommation d'énergie pour le refroidissement et le chauffage.

III.5.3. Propriétés thermiques des matériaux d'isolation

La présence d'une isolation thermique fournit une zone isolante qui permet d'inhiber le transfert de chaleur au lieu d'être absorbé par le matériau. La capacité d'isolation d'un matériau est déterminée par sa conductivité thermique. Ainsi, plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau ayant la même épaisseur est isolant. Un matériau est considéré comme isolant lorsque la résistance thermique est supérieure à 0,5 m²K/W. (UNIDO, 2017).

III.5.4. Les principaux isolants thermiques

Les matériaux d'isolation des bâtiments peuvent être principalement classés en trois catégories : les matériaux conventionnels, les matériaux de pointe et les matériaux durables (Kumar et al., 2020).

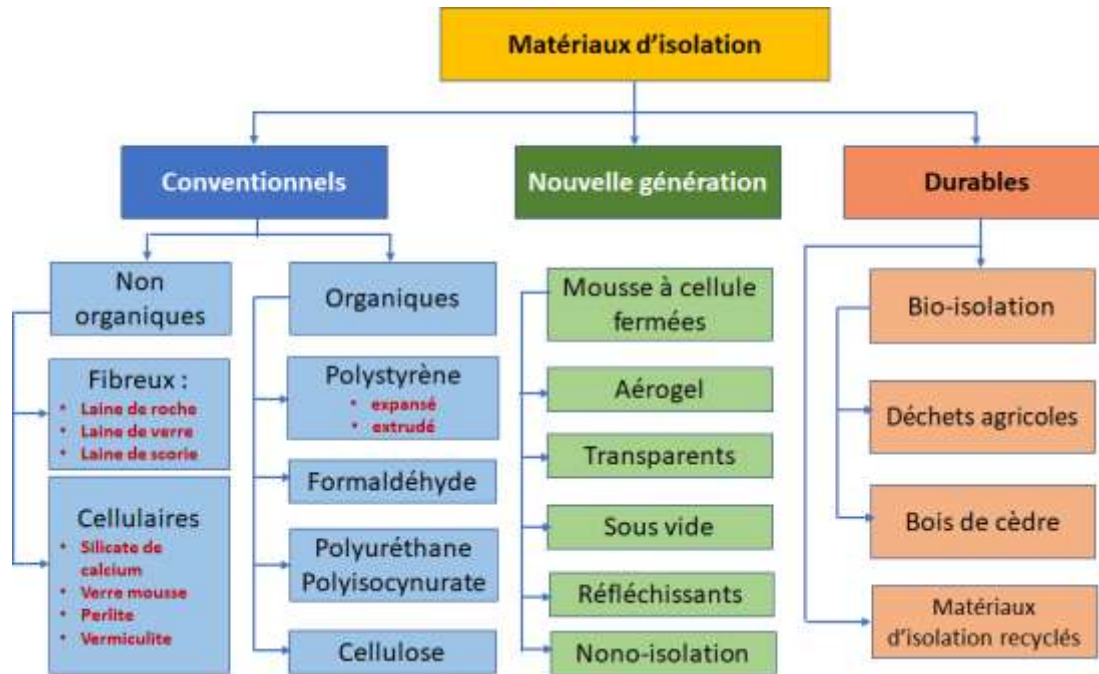


Figure III.5: Classification des matériaux d'isolation (source Kumar, 2020)

III.5.5. Position des isolants thermiques

Outre l'épaisseur des matériaux d'isolation, la position de l'isolation a un impact important sur la consommation d'énergie et l'environnement. Il existe plusieurs procédés d'isolation des murs extérieurs : l'isolation par l'intérieur, l'isolation par l'extérieur et l'isolation par remplissage de la lame d'air dans le cas d'un mur creux.

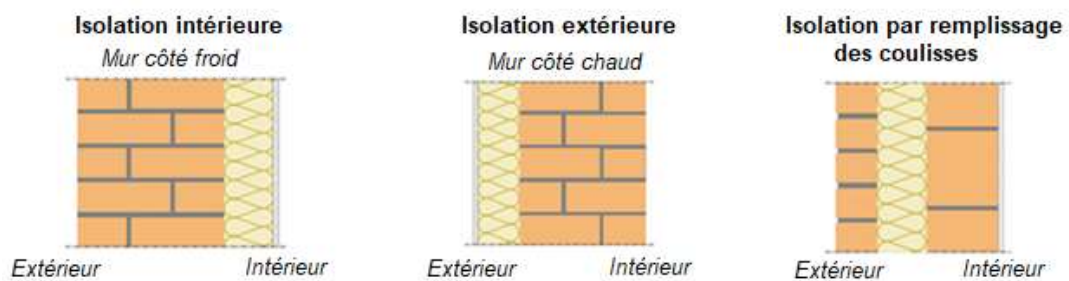


Figure III.6 : Procédés d'isolation thermique des murs extérieurs (source_mrw.wallonie)

Asan (1999) a déterminé l'emplacement optimal de l'isolant en plaçant la moitié de l'isolation dans le plan central du mur et l'autre moitié à l'extérieur. Dans leur étude, Ozel et al., (2007) ont examiné le meilleur positionnement de l'isolation dans 12 conceptions distinctes de murs extérieurs et ont montré que l'isolation placée sur la surface du mur extérieur a fourni la meilleure performance énergétique.

III.6. Fenêtres et Vitrage

La fenêtre revêt une importance particulière dans la conception du bâtiment tant du point de vue de la performance énergétique que de l'esthétique en raison de son incidence sur la consommation énergétique globale du bâtiment qui est déterminée par de nombreux facteurs dans la position, l'orientation et les dimensions et les matériaux constitutants (Laustsen, 2008). Par conséquent, le choix des matériaux de fenêtrage revêt une grande importance car il doit tenir compte des propriétés particulières du vitrage (transmission visuelle VT, valeurs U, SHGC) et éviter les gains/pertes de chaleur qui se traduisent par une augmentation de la consommation d'énergie et des niveaux d'inconfort des occupants (Aksamija, 2013).

III.6.1. Types de vitrage

Le vitrage des bâtiments a un effet significatif sur l'utilisation de l'énergie dans l'ensemble du bâtiment et il est responsable de l'échange de chaleur et de l'inconfort thermique. Les fenêtres couramment utilisées dans les applications architecturales peuvent se présenter avec des vitrages sous forme de vitrage simple, vitrage revêtu ou teinté, ou sous forme de double, voire de triple vitrage avec un espace intermédiaire rempli d'aérogel ou de gaz inertes sous forme d'isolation. (Torcellini et *al.*, 2006).

- **Simple vitrage**

En matière de transfert thermique, le simple vitrage est considéré comme mauvais isolant. Il transmet environ 1 Watt par mètre Kelvin (W/mK) à l'environnement extérieur. Avec une conductivité thermique relativement élevée de 5,5 W/m²K, les fenêtres à simple vitrage offrent une isolation thermique insuffisante. (Petersen et *al.*, 2016).

- **Double vitrage**

La principale caractéristique des fenêtres à double ou triple vitrage est qu'elles sont constituées de plusieurs vitres empilées les unes sur les autres et séparées par des espaces remplis d'air ou d'autres gaz neutres comme l'argon. Ce type de fenêtre peut réduire considérablement la quantité d'énergie nécessaire pour refroidir un bâtiment en diminuant la quantité de rayonnement solaire traversant les fenêtres (Figure III.6).

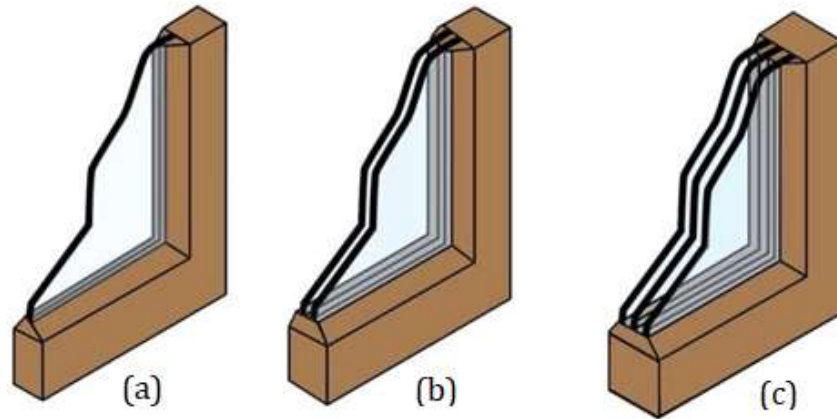


Figure III.7 : Types de vitrages : (a) simple vitrage ; (b) double vitrage ; (c) triple vitrage
L'espace entre les vitres (b et c) est généralement rempli de gaz : argon ou kripton (source_ARPA_E)

- **Vitrage teinté (spectralement sélectif)**

Conçus pour réduire la pénétration de la lumière et de la chaleur et améliorer le niveau de protection thermique dans les bâtiments, les vitrages revêtus spectralement sélectifs garantissent que tout gain solaire absorbé soit perdu dans l'environnement extérieur. Cette forme de vitrage est un excellent choix pour les régions des climats chauds.

- **Vitrage à faible émissivité (Low-E)**

Le vitrage à faible émissivité est conçu pour réduire le transfert de chaleur par rayonnement à ondes longues entre les couches de vitrage, ce qui entraîne une réduction de 20 à 35 % des valeurs U des surfaces vitrées tout en maintenant un niveau élevé de transmission de la lumière (Faggal et al.,2019).

L'ajout d'un revêtement à faible émissivité à une fenêtre équivaut essentiellement à l'ajout d'une vitre supplémentaire. Les valeurs d'émissivité représentatives de différents types de verre sont indiquées ci-dessous (Kibert, 2016).

- Verre transparent, sans revêtement : 0.84
- Verre avec une seule couche dure à faible émissivité (Low-E) : 0,15
- Verre avec une seule couche souple à faible émissivité (Low-E2) : 0.10

III.6.2. Performances thermiques des vitrages

La performance des fenêtres est une combinaison de plusieurs facteurs : le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC), la transmission de lumière visible du verre (VT), la conductivité thermique (valeur U) et le caractère d'infiltration ou de fuite de l'assemblage de la fenêtre.

III.6.2.1. Conductivité thermique (valeur U)

La conductivité thermique (valeur U) des façades vitrées est une mesure de leurs caractéristiques thermiques. Cette valeur U permet de quantifier le taux de flux de chaleur causé par la différence de température entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur.

III.6.2.2. Coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)

Le coefficient de gain de chaleur solaire, (de l'anglais *Solar Heat Gain Coefficient*-SHGC) est la proportion de l'énergie solaire totale qui traverse le verre à incidence normale et qui se transforme dans le bâtiment sous forme de chaleur. Le SHGC comprend la transmission solaire directe et l'absorption solaire dissipée par rayonnement et convection. Les fenêtres orientées vers le sud dans les structures solaires passives doivent avoir un SHGC élevé pour les gains de chaleur solaire en hiver. Les fenêtres orientées vers l'est ou l'ouest reçoivent un rayonnement solaire élevé le matin et l'après-midi et doivent avoir un SHGC plus faible (Kiebert, 2016).

III.6.2.3. La transmission de la lumière visible (VT)

Le facteur de transmission de la lumière visible, (de l'anglais *Visual Transmittance*-VT) est similaire au SHGC, mais au lieu de mesurer l'énergie sur l'ensemble du spectre, il se concentre uniquement sur la lumière visible. Une fenêtre claire à simple vitrage avec un VT de 0,90 laisse passer 90 % de la lumière visible. Comme un VT élevé correspond à un SHGC élevé, un équilibre entre le rayonnement solaire et l'éclairage est nécessaire (Kiebert, 2016).

III.6.2.4. Rapport (LSG) entre le gain de chaleur solaire et le facteur de transmission visible.

Le rapport lumière/gain solaire (LGS), ou le rapport entre SHGC et VT, calculé par $LSG = VT/SHGC$, permet de mesurer l'efficacité des différents types de vitrage pour transmettre la lumière du jour tout en empêchant les gains de chaleur. Un rapport LSG supérieur à 1 signifie qu'une fenêtre a réussi à maintenir son facteur VT élevé tout en réduisant son SHGC.

Tableau (III.1) Valeurs typiques de SHGC, VT et LGS pour différents types de vitrage en fonction de : Fenêtre totale et centre du verre (entre parenthèses). (Kiebert, 2016).

Type de fenêtre et vitrage	SHGC	VT	LGS
Simple vitrage, clair	0.79 (0.86)	0.69 (0.90)	0.87 (1.04)
Double vitrage, clair	0.58 (0.86)	0.57 (0.81)	0.98 (1.07)
Double vitrage, bronze	0.48 (0.62)	0.43 (0.61)	0.89 (0.98)
Double vitrage, spectralement sélectif	0.31 (0.41)	0.51 (0.72)	1.65 (1.75)
Triple vitrage, faible émissivité (Low-E)	0.37 (0.49)	0.48 (0.68)	1.29 1.39)

III.6.3. Impact des caractéristiques des fenêtres sur la performance énergétique.

Lors de la conception de façades à haut rendement énergétique, il est impératif de prendre en compte les propriétés optiques et thermiques du vitrage lors de la sélection des matériaux pour les façades vitrées. Les caractéristiques d'une fenêtre moderne à haute performance adaptée aux climats chauds sont illustrées à la figure (III.8).

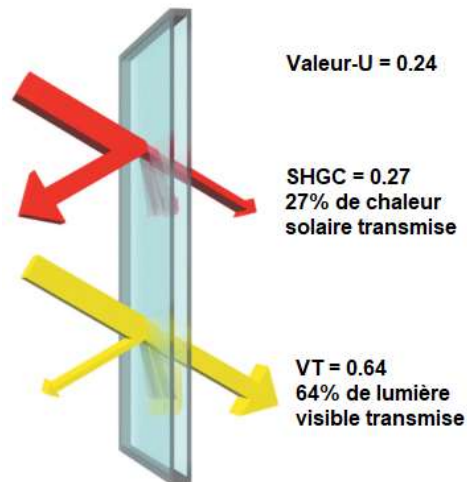


Figure III.8 : Caractéristiques d'une fenêtre typique à double vitrage avec un faible SHGC, un verre à faible émissivité, rempli de gaz argon. (source_ Kibert, 2016)

III.6.4. Rapport fenêtre-mur (WWR)

Le rapport fenêtre-mur (de l'anglais *Window to Wall ratio* -WWR) représente le rapport entre la partie vitrée et opaque de la façade. Le WWR est mesuré sur une échelle de 0 à 100 % ou sur un facteur de 0 à 1, respectivement pour l'absence de fenêtres et les fenêtres complètes. Ces deux

extrêmes entraînent généralement des effets négatifs en termes d'énergie, d'éclairage naturel et de visibilité.

Plusieurs analyses relatives à l'effet de la conception des façades sur la consommation énergétique des bâtiments ont montré l'impact du type de fenêtre et de ses propriétés optiques liées à sa surface. Ces études ont montré que la réduction du WWR augmente l'efficacité énergétique, mais d'un autre côté, elle réduit également l'efficacité de l'éclairage naturel. Par conséquent, des valeurs maximales de WWR ont été calculées pour que les charges de chauffage et de refroidissement des bureaux ne dépassent pas ces valeurs limites. (Ihara et al., 2015)

III.7. Ombrage et protection solaire

La protection solaire est une méthode simple pour bloquer le soleil avant qu'il ne pénètre dans le bâtiment. Elle permet de minimiser les besoins en demande d'énergie pour le refroidissement et fait partie du premier niveau de l'approche de conception à trois niveaux pour refroidir un bâtiment, comme illustré en figure III.9. (Lechner, 2014).

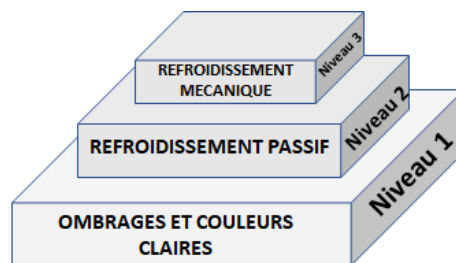


Figure III.9 : L'approche de conception à trois niveaux pour un confort thermique en été.

(source_Lechner, 2014)

III.7.1. Dispositif de protection solaire extérieure

Les dispositifs de protection solaire externe permettent de limiter la quantité de lumière solaire qui pénètre dans les bâtiments par rayonnement solaire et la quantité de chaleur qui en résulte. Idéalement, un dispositif d'ombrage extérieur devrait être conçu pour compenser les gains en été et les pertes en hiver.

III.7.2. Types généraux de dispositifs de protection solaire extérieure

L'élément d'ombrage extérieur peut être classé grossièrement dans l'une des trois catégories suivantes : horizontal (porte-à-faux ou surplomb), vertical (lame latérale) ou en forme croisée (*eggcrate*). (Lechner, 2014).

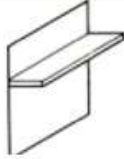
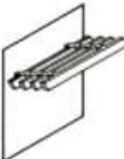

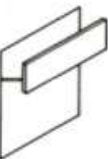

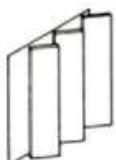

		Descriptive Name	Best Orientation*	Comments
I		Overhang Horizontal panel or awning	South, east, west	Traps hot air Can be loaded by snow and wind Can be slanted
II		Overhang Horizontal louvers in horizontal plane	South, east, west	Free air movement Snow or wind load is small Small scale Best buy!
III		Overhang Horizontal louvers in vertical plane	South, east, west	Reduces length of overhang View restricted Also available with miniature louvers
IV		Overhang Vertical panel	South, east, west	Free air movement No snow load View restricted
V		Vertical fin	North	Restricts view if used on east and west orientations
VI		Vertical fin slanted	East, west	Slant toward north in hot climates and south in cold climates Restricts view significantly Not recommended
VII		Eggcrate	East, west	For very hot climates View very restricted Traps hot air Not recommended

Figure III.10 : Types généraux de protections solaires extérieures (source_Lechner, 2014)

III.7.3. Protection solaire intérieure

Les dispositifs d'ombrage internes, tels que les rideaux, les stores à rouleau, les stores vénitiens et les volets, comme présentés en figure III.11, sont également essentiels pour un certain nombre de raisons pratiques. (Lechner, 2014)

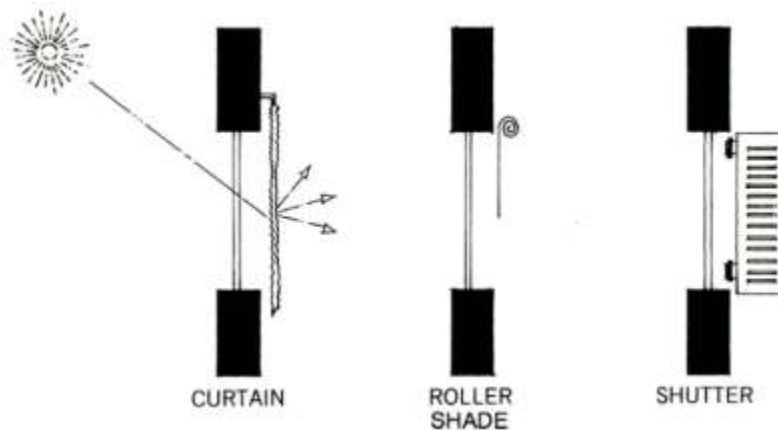


Figure III.11 : Dispositif d'ombrage intérieur pour le contrôle solaire (source_Lechner, 2014)

III.7.4. Contrôle des dispositifs d'ombrage et critères d'évaluation des performances

Des dispositifs d'ombrage motorisés avec une approche de contrôle intelligent sont utilisés pour optimiser la lumière du jour et les performances du rayonnement solaire au regard des caractéristiques de la dynamique solaire. Avec une approche intégrée de commande automatique des dispositifs d'ombrage motorisés en conjonction avec des systèmes d'éclairage électrique programmables, une réduction significative de la consommation d'énergie pour le refroidissement et l'éclairage pourrait être réalisée. (Tzempelikos et al., 2007)

III.7.5. Impact des protections solaires sur le rendement énergétique

Il a été démontré que l'utilisation de la protection solaire permet de réduire l'éblouissement et d'augmenter la lumière du jour utilisable (entre 100 et 2000 lux) dans les bâtiments. L'ombrage horizontal peut permettre d'économiser jusqu'à 18,6 % d'énergie dans les zones orientées au sud et 7,7 % dans les zones orientées au nord, selon Alwetaishi et al, (2021).

La recherche a révélé que la consommation d'énergie d'un bâtiment est affectée par le type de dispositifs d'ombrage installés sur la façade du bâtiment, indépendamment des dispositifs d'ombrage évalués.

III.8. Conclusion

Il est nécessaire que la façade du bâtiment, telle que matérialisée par ses parties opaques, vitrées et d'occultation, soit soumise à de nombreuses exigences afin de répondre aux besoins imposés par le climat. Dans ce contexte, le coefficient de transmission thermique, l'inertie thermique et les qualités de la surface extérieure déterminent les caractéristiques de la paroi extérieure. Les surfaces vitrées sont évaluées en fonction de leurs dimensions, à savoir leur surface d'ouverture (WWR), et de leur aspect physique, qui est à son tour déterminé par les qualités thermiques et visuelles de la surface.

Le présent chapitre a été consacré au comportement de ces paramètres ainsi qu'à leur mode de mesure et de quantification. Ce faisant, des concepts sur l'échange thermique statique ont été intégrés dans l'étude approfondie du comportement transitoire des matériaux. Pour sa part, l'isolation thermique améliore la transmission thermique du mur, ce qui joue un rôle important dans la réduction des pertes thermiques qui se produisent pendant la phase opérationnelle de la structure ainsi que des pertes environnementales causées par l'énergie intrinsèque des composants du bâtiment. De son côté, l'impact de l'inertie thermique peut être apprécié grâce à l'évaluation de la performance dynamique des murs par la méthode de l'admittance afin de déterminer son facteur de décrémentation et son décalage temporel (déphasage). Comme il est possible d'optimiser les surfaces vitrées et leurs dispositifs de protection solaire en fonction du type de bâtiment et de son utilisation.

Enfin, bien que les dispositifs de protection solaire puissent réduire la sensation d'éblouissement des utilisateurs et limiter la quantité de rayonnement solaire incident, les performances thermiques et visuelles des éléments de fenêtrage ne peuvent être contestées. Cela souligne l'importance de choisir le bon type de vitrage pour réduire la quantité d'énergie consommée par le bâtiment.

Chapitre IV

Contexte de l'étude,
choix du bâtiment de référence et
présentation de la méthodologie d'analyse

CHAPITRE IV. Contexte de l'étude, choix du bâtiment de référence et présentation de la méthodologie d'analyse

IV.1. Introduction

Le climat chaud et sec occupe la plus grande partie du territoire algérien. Les attributs extrêmes caractérisant ce climat nécessitent des stratégies de conception spécifiques, visant comme principe directeur l'atténuation des rayons directs du soleil, dont l'intensité fluctue en fonction de l'emplacement. En outre, compte tenu du fait que les bâtiments de bureaux en Algérie sont des structures à forte consommation d'énergie primaire, ils suivent la plupart du temps un régime intermittent, et présentent donc une complexité différente dans la gestion des conditions limites et des paramètres de leur fonctionnement thermique. En contrepartie, ces spécificités offrent un potentiel élevé pour améliorer les besoins du bâtiment tertiaire en matière de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. D'autre part, avant d'entamer l'investigation expérimentale une étape importante consiste à établir une connaissance spécifique de l'état des bâtiments étudiés en termes de modes et systèmes de construction selon les procédés couramment utilisés dans la réalité.

A ce titre, ce chapitre introduit la partie analytique de la thèse et se divise en deux parties. La première fait une description des attributs climatiques du contexte d'étude retenu, à savoir la ville de Biskra ; ensuite, il présente le corpus de l'étude et ses caractéristiques ainsi que le protocole empirique exploité pour la collecte de données. Un diagnostic qualitatif et quantitatif

sur un échantillon d'immeubles de bureaux est en outre effectué afin de mieux comprendre l'impact des éléments de la façade sur le fonctionnement thermique du bâtiment. Une analyse et comparaison de leur performance est réalisée et finalement un cas d'étude est sélectionné.

La deuxième partie du chapitre présente l'outil de simulation dynamique Rhinoceros/Grasshopper avec les plugins environnementaux "Ladybug & Honeybee" fournis par EnergyPlus. Une validation et calibration préliminaire du modèle énergétique du bâtiment cas d'étude est effectuée. Parallèlement, la définition des conditions limites et des paramètres de fonctionnement du modèle de référence a été effectuée comme préliminaire à l'étape de l'étude paramétrique par simulation.

PARTIE 01 : Contexte d'étude : la ville de Biskra, présentation, climat local et protocole analytique des bâtiments de bureau

IV.2. Contexte d'étude : La ville de Biskra

Cette recherche étudie l'effet des éléments de façade opaques, transparents et de protection solaire sur la performance énergétique des immeubles de bureaux dans le cas des climats chauds et secs en Algérie. De ce fait, il est particulièrement pertinent d'attribuer un site représentatif retraçant à la fois les paramètres climatiques et les pratiques de construction caractérisant un tel contexte. La ville de Biskra a été choisie pour servir de cadre à l'étude, considérant qu'elle a fait l'objet d'un intérêt particulier et de multiples recherches académiques dans ce domaine en raison de l'aspect diachronique diversifié de ces bâtiments tertiaires.

IV.2.1. Présentation

La ville de Biskra (chef-lieu de la Wilaya de Biskra en 1974 et reine des Ziban), est située en Algérie, à 356 kilomètres au sud-est de la capitale Alger (Latitude : 34,51° NORD, Longitude : 5,44° EST, Altitude : 87 mètres s.n.m) avec une superficie de 127,6 km² et une population d'environ 206000 habitants (DB-city).

IV.2.2. Aperçu des caractéristiques climatiques de Biskra

La conception de bâtiments énergétiquement efficaces et confortables nécessite l'harmonisation des interactions complexes entre l'architecture, la construction et l'ingénierie des services du bâtiment (Mitterer et al., 2012). Cela ne peut être réalisé qu'en établissant des connaissances spécifiques au climat, c'est-à-dire la température et l'humidité de l'air, l'ensoleillement, le vent et les précipitations, nécessaires à la conception de techniques et de mesures actives et passives avancées pour les bâtiments. La ville de Biskra, localisée dans la

figure IV.1, est caractérisée par des conditions climatiques extrêmes : des étés étouffants et des hivers longs et frais avec une température moyenne annuelle de 22,4 °C, et un temps sec et généralement clair toute l'année ; elle est définie comme une ville représentative des régions à climat chaud et sec qui occupent 89% du pays (classe BWh selon la classification de Köppen-Geiger (Peel MC et al., 2007). En détail, dans ce qui suit, une analyse des facteurs climatiques spécifiques à l'emplacement a été effectuée, et les valeurs rapportées sont basées sur un fichier de données météorologiques d'une année typique extrait de la station météorologique de l'"Aéroport Mohamed Khider" (Latitude : 34.793°NORD, Longitude : 5.739° EST, Altitude : 88.1 m s.n.m) en référence à une période de 15 ans, 2004 à 2018.

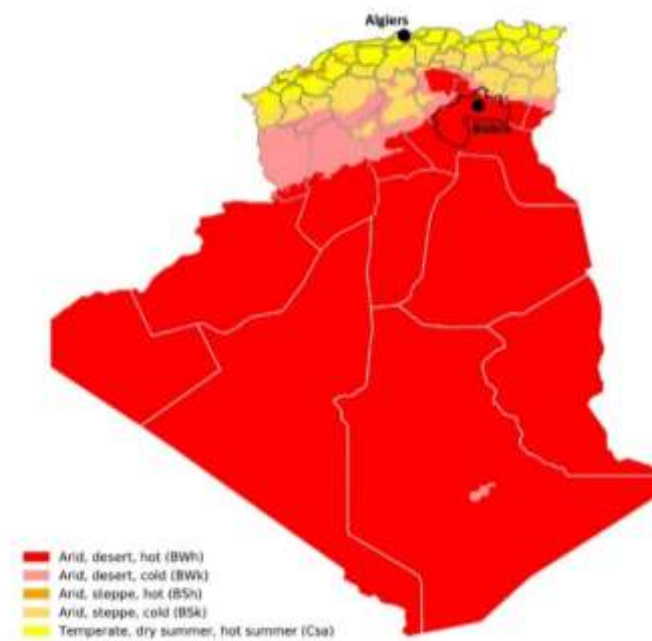


Figure IV.1 : Localisation géographique et climatologique de la ville de Biskra en Algérie. La définition des climats est basée sur la classification de Köppen-Geiger (Source : Nature Scientific Data, adapté par : Auteur)

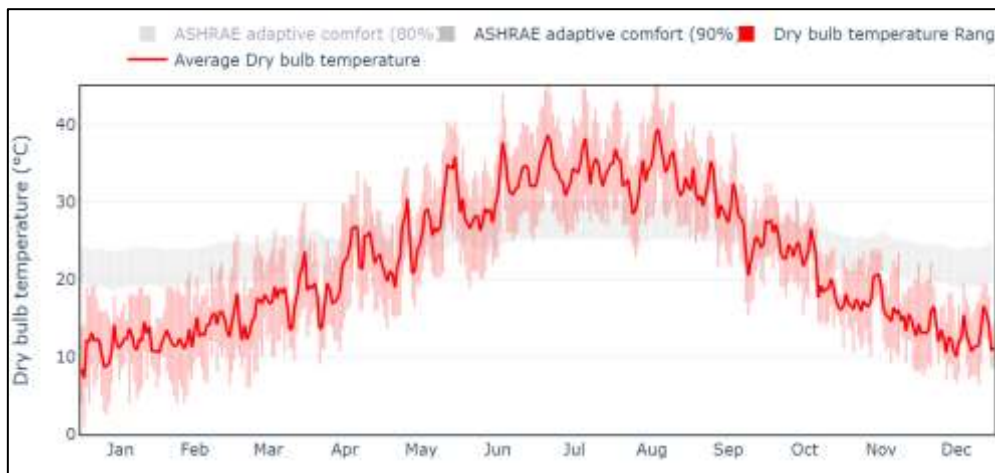
IV.2.2.1. Température de l'air

La méthode introduite par A. Hamouda et *al.*, (2018) et rapportée par (ENAG) définissant les périodes chaudes et froides par des seuils de température moyenne du bulbe sec de 25°C et 15°C respectivement a été adoptée. Ainsi, sous cette considération, ces deux périodes sont présentées comme suit :

- Une longue période chaude : s'étendant du 24 avril au 10 septembre avec une température moyenne supérieure à 25°C. Les températures les plus élevées sont enregistrées au mois de juillet avec une température moyenne de 34,6 °C et une température maximale de 45°C. De plus, la période d'étouffement est également

observée comme le montre la figure IV. 2, dépassant un seuil de 30°C de température MAX au-delà de la gamme de confort adaptative de la norme ASHRAE s'étendant du 8 juin au 10 septembre.

- Une courte période froide : elle s'étend du 20 novembre au 21 février où les températures les plus basses sont enregistrées en janvier avec une température moyenne de 11,5°C et une température minimale de 1°C.



De plus, d'après la figure IV.2, l'amplitude de la température, définie comme la différence entre la température maximale et minimale, varie entre 7,2°C pendant la période froide et 10,1°C pendant la période chaude.

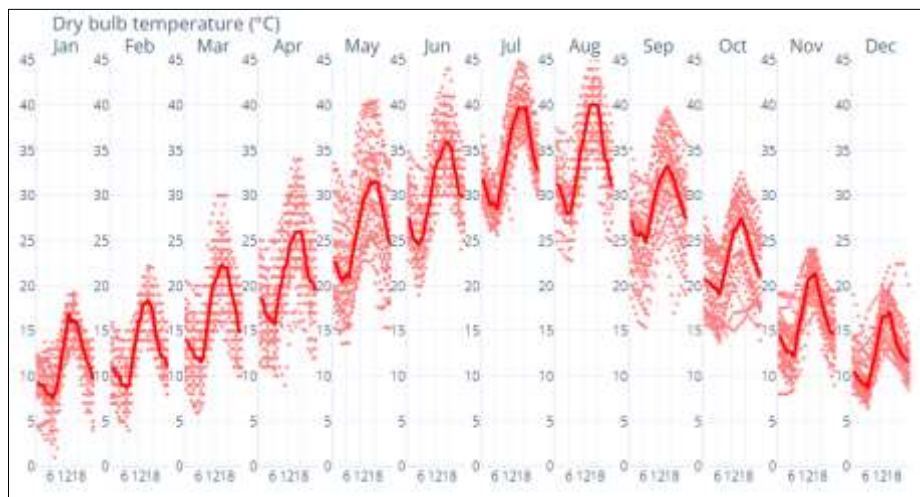


Figure IV.3 : Graphique de la température extérieure quotidienne (Source : Clima.cbe.berkeley.edu)

IV.2.2.2. Humidité relative

La figure IV.4 présente l'humidité relative annuelle moyenne à 43%. Les valeurs moyennes mensuelles sont plutôt faibles pendant une longue période s'étendant du mois de mai au mois d'août, allant de 27,7 % à 35,3 %. Néanmoins elles augmentent pendant les autres mois avec des valeurs dans la bande de confort d'humidité, atteignant un maximum de 60,3 % pendant le mois de décembre.

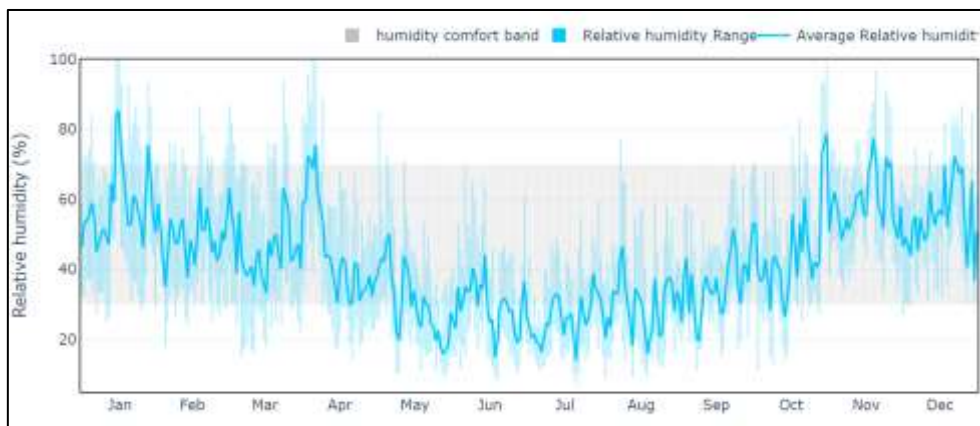


Figure IV.4 : Humidité relative mensuelle. (Source : *Clima.cbe.berkeley.edu*)

IV.2.2.3. Ensoleillement

La figure IV.5 illustre l'évolution quotidienne du rayonnement horizontal global (direct 64% et diffus 26%). Le rayonnement solaire annuel cumulé est de 2025,77 kWh/m² pour 1074 heures d'insolation, et la période de forte intensité s'étend d'avril à août.

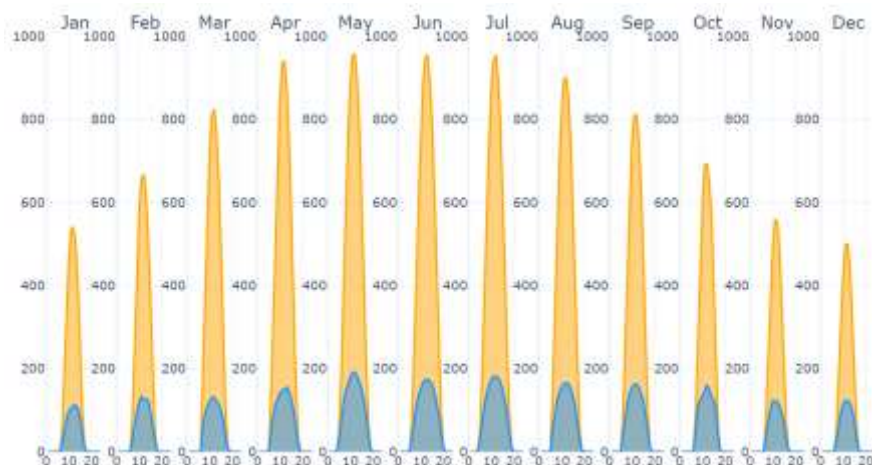


Figure IV.5 : Rayonnement solaire global annuel (Source : *Clima.cbe.berkeley.edu*)

IV.2.2.4. Vent

D'après les données météorologiques, les vents dominants sont du sud-est au printemps et en été, et du nord-ouest en automne et en hiver. L'endroit connaît de légères variations

saisonniers au cours de l'année, avec une vitesse moyenne annuelle du vent de 3,3 m/s ; la partie la plus venteuse (poussièreuse) de l'année dure du 15 février au 10 juin, avec une vitesse dépassant 3,6 m/s.

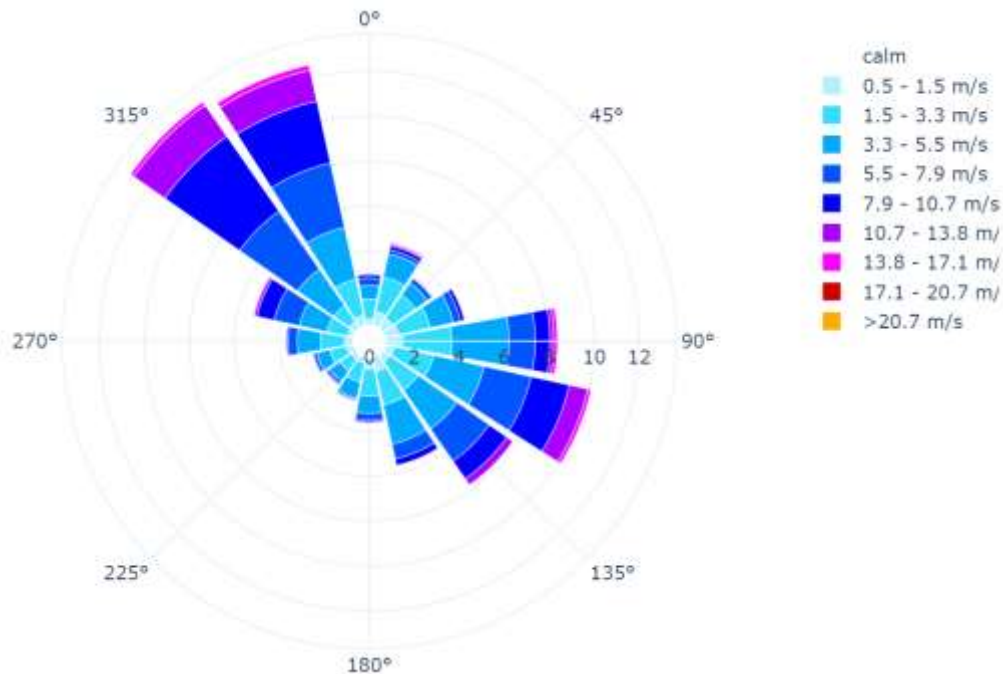


Figure IV.6 : Rose des vents de Biskra (Source : Clima.cbe.berkeley.edu)

IV.2.2.5. Précipitation et aridité

En raison de l'emplacement englouti entouré par le Nord et le Sud de l'Atlas Tellien, les précipitations à Biskra sont présentées avec des quantités rares. La moyenne annuelle est de 125 mm, selon laquelle, l'application sur l'indicateur d'aridité de Martonne qui confirme l'aridité de l'emplacement, est calculée par la formule (1) et donne une valeur de $3.85 < 5$

$$Im = \frac{P}{(T + 10)} \quad (1)$$

IV.2.3. Analyse bioclimatique

En termes de température de l'air, d'humidité relative et de rayonnement solaire, les valeurs extrêmes caractérisant les conditions climatiques de la région s'écartent initialement de la norme ASHRAE de confort adaptatif. Cependant, certaines considérations peuvent être abordées à travers une analyse bioclimatique. La méthode de Givoni a été réalisée à travers l'outil performant "Climate consultant" basé sur le fichier de données météorologiques (2004-2018, TMY) introduit précédemment. Ce dernier fournit finalement des concepts avancés de chauffage et de refroidissement passifs testés et établis, s'attaquant, à un certain degré de

réussite, à la satisfaction des critères de confort thermique, et donc à la consommation d'énergie dans un bâtiment.

La figure IV.7 présente le graphique psychométrique de l'interface utilisateur du logiciel. L'analyse est appliquée au cas d'un bâtiment non résidentiel correspondant au domaine de notre recherche et démontre initialement 1464 heures de confort tout au long de l'année. Néanmoins, cela peut être amélioré jusqu'à 99,9% (jusqu'à 8754 heures de confort) grâce aux recommandations suivantes :

- Protection solaire des fenêtres (20,4%) : Minimiser ou éliminer les vitrages orientés vers l'ouest et favoriser les orientations vers le sud avec des surplombs ou des pare-soleil ouvrants conçus pour ombrager complètement la fenêtre en été et maximiser les gains solaires en hiver. En ce qui concerne le matériau des fenêtres, prévoir un double vitrage à haute performance (Low-E) à l'ouest, au nord et à l'est, mais clair au sud pour un gain solaire passif maximal.
- Masse importante à gain solaire direct passif (11,9%)
- Ventilation de confort adaptée (18,2%) : Des fenêtres bien ombragées et orientées peuvent réduire les besoins en climatisation pendant les périodes chaudes et favoriser la ventilation transversale dans le bâtiment.
- Refroidissement par évaporation à deux phases (33,3 %)
- Refroidissement et chauffage (35,4 %)

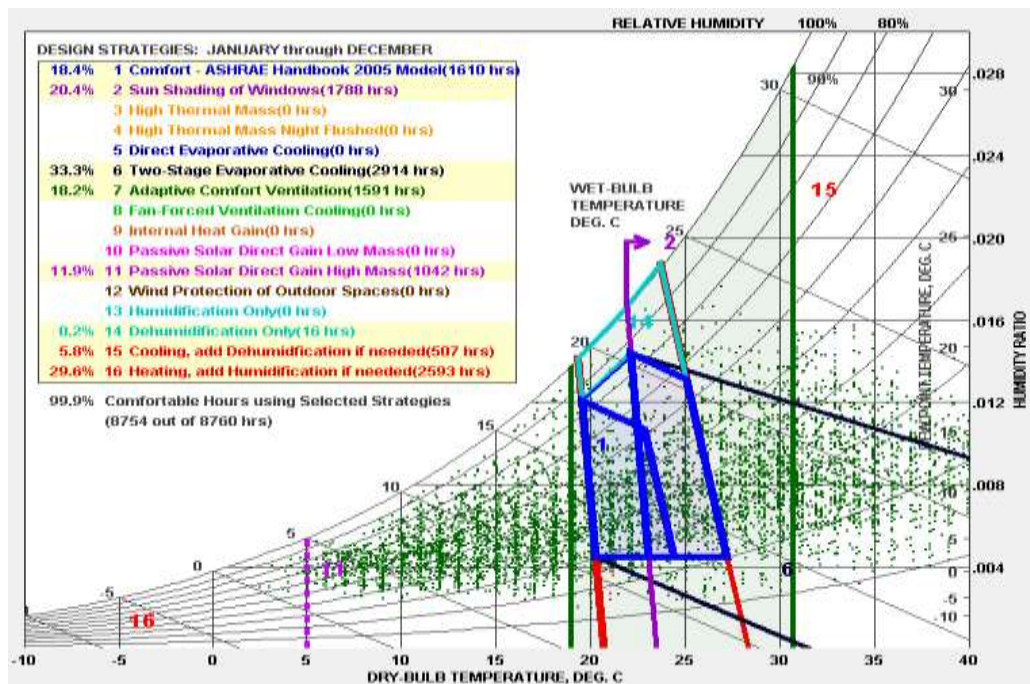


Figure IV.7 : Diagramme psychrométrique de la ville de Biskra (Source :Auteur, 2022)

IV.3. Bâtiments de bureaux à Biskra, une analyse prospective en vue de définir un cas d'étude représentatif

IV.3.1. Présentation de l'objet d'étude

Les bâtiments de bureaux, représentant une entité omnipotente du secteur tertiaire ; de plus, ils sont les deuxièmes plus grands consommateurs d'énergie finale dans le secteur du bâtiment en Algérie. Les pratiques constructives récentes de ces bâtiments, et plus particulièrement celles des bâtiments administratifs gouvernementaux, reposent sur la réglementation thermique nationale affirmée par le gouvernement dans les DTR 3-2 et DTR 3-4. Bien que l'objectif de l'application de ces réglementations soit d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment, il faut préciser qu'elles ne fournissent pas de directives prescriptives spécifiques au climat pour la conception de l'enveloppe dans le cadre d'un code d'efficacité énergétique des bâtiments.

Par conséquent, au regard du climat chaud et sec de Biskra et de ses étés longs et torrides avec des fluctuations de température au-dessus de la zone de confort des occupants et des radiations solaires intenses, le choix des bâtiments de bureaux comme objet d'étude présente de multiples opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique en termes de configuration des composants opaques et vitrés de la façade du bâtiment qui peuvent être optimisés expérimentalement. À cet effet, une étape préalable est nécessaire, celle qui consiste à établir

une connaissance spécifique sur l'état des bâtiments en termes de pratiques constructives des immeubles de bureaux à Biskra dans son ensemble, et de construire une vue d'ensemble sur les aspects formels et constructifs actuels de ses façades.

IV.3.2. Aperçu général sur les bâtiments de bureaux à Biskra

La plupart des bâtiments de bureaux de la ville de Biskra sont localisés dans le périmètre urbain de la ville, c'est-à-dire le centre-ville et les nouvelles extensions, avec une minorité plus ou moins décentralisée. Les immeubles de bureaux actuels ont principalement une vocation opérationnelle de nature administrative et de services. Isolés et de morphologies différentes, la situation de ces bâtiments et les modes constructifs de leurs façades sont liés à leur adéquation avec la période de leur implantation, et sur la base de laquelle ils peuvent être catégorisés comme suit:

- *Bâtiments de la période coloniale (construits avant 1962)*

Localisés dans le tissu urbain ancien du centre-ville, les bâtiments tels que la "Banque Nationale d'Algérie (BNA), l'Annexe des services de l'état civil, l'ex-Daira...etc sont des constructions coloniales héritées et établies avec des murs extérieurs massifs en pierre. Des actions de réhabilitation ont été menées pour la plupart de ces bâtiments afin de restaurer leur esthétique et d'améliorer leur fonctionnalité.

- *Bâtiments de la période post-coloniale et d'expansion (1965 - 2000)*

Représentant une part importante du secteur des bâtiments tertiaires, ces édifices ont été construits après l'indépendance du pays et ont été prolongés avec les mêmes normes constructives jusqu'en 2000. Les exemples de la nouvelle APC, du siège du Trésor et du CNAS... etc. sont des bâtiments administratifs gouvernementaux, et ont suivi un système constructif typique pour les façades consistant en un mur de briques pour les surfaces opaques, un vitrage simple à couche claire avec des cadres en bois. De plus, une minorité d'entre eux ont bénéficié d'actions de rénovation de façade, comme le bâtiment du CNAS, vers une esthétique plus contemporaine.

- *Bâtiments récents (de 2000 à aujourd'hui)*

A partir de 2000, on assiste à une forte expansion de la construction d'immeubles de bureaux. Au fur et à mesure que de nouveaux départements administratifs ont été introduits dans la ville de Biskra (Direction des travaux publics "DTP", Direction du tourisme "DT"...etc), et en raison du déplacement pour une expansion des plus anciens (Direction de l'Urbanisme de

l'Architecture et de la Construction "DUAC", Hydraulique "DHW"), ce secteur représente maintenant la plus grande part localement présente du secteur tertiaire à Biskra.

Comme ces bâtiments ont été établis selon les normes de construction nationales en suivant les Documents Techniques Réglementaires "DTR" existants (qui ont subi des mises à jour et des corrections opportunes), principalement de nature gouvernementale ou administrative, ces derniers suivent des pratiques constructives similaires concernant le système structurel et l'enveloppe. Dans le détail, les composants de l'enveloppe ont permis une plus grande transparence avec des ouvertures de fenêtres variables avec des cadres en bois ou en aluminium avec du verre simple clair, voire même en appliquant partiellement des murs rideaux sur une certaine partie de la surface de la façade avec du double vitrage simple ou non performant.

Quant aux surfaces opaques, les murs extérieurs sont légèrement isolés avec une lame d'air prise entre 2 couches de murs en briques creuses. Ces éléments de façade sont protégés des rayons du soleil de façon très incohérente, avec des ombres impliquées par leur géométrie, et des surplombs qui répondent le plus souvent à un objectif esthétique non fonctionnel.

IV.3.3. Protocole d'analyse

Une analyse typologique prospective est réalisée en se basant sur les documents architecturaux graphiques et photographies avec des visites sur site pour d'éventuelles corrections, ainsi que l'évaluation de la consommation d'énergie (données acquises auprès du siège de SONELGAZ pour l'année 2018), le tout spécifique à un échantillon présélectionné de bâtiments de bureaux récemment édifiés. L'analyse comprend une évaluation complète basée sur des critères définissant les divers éléments des façades des immeubles de bureaux, avec un accent particulier sur l'évaluation métrique des facteurs les plus influents en termes de consommation d'énergie dédiée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage.

L'objectif est d'établir une vue d'ensemble sur les aspects formels et constructifs des façades de bâtiments de bureaux actuellement présents. Par la suite, après la qualification et la quantification de leurs attributs, une généralisation de leurs métriques permet de choisir un cas d'étude représentatif et de définir les plages de variables nécessaires à l'établissement du modèle énergétique pertinent pour le cadre de notre recherche.

IV.3.3.1. Définition de l'échantillon à étudier

Un ensemble de 10 bâtiments administratifs a été sélectionné comme échantillon pour cette analyse et est localisé sur la carte urbaine de Biskra dans la figure IV.8 et identifié dans le tableau IV.2 (informations supplémentaires sur les bâtiments sont reportées dans l'annexe B).

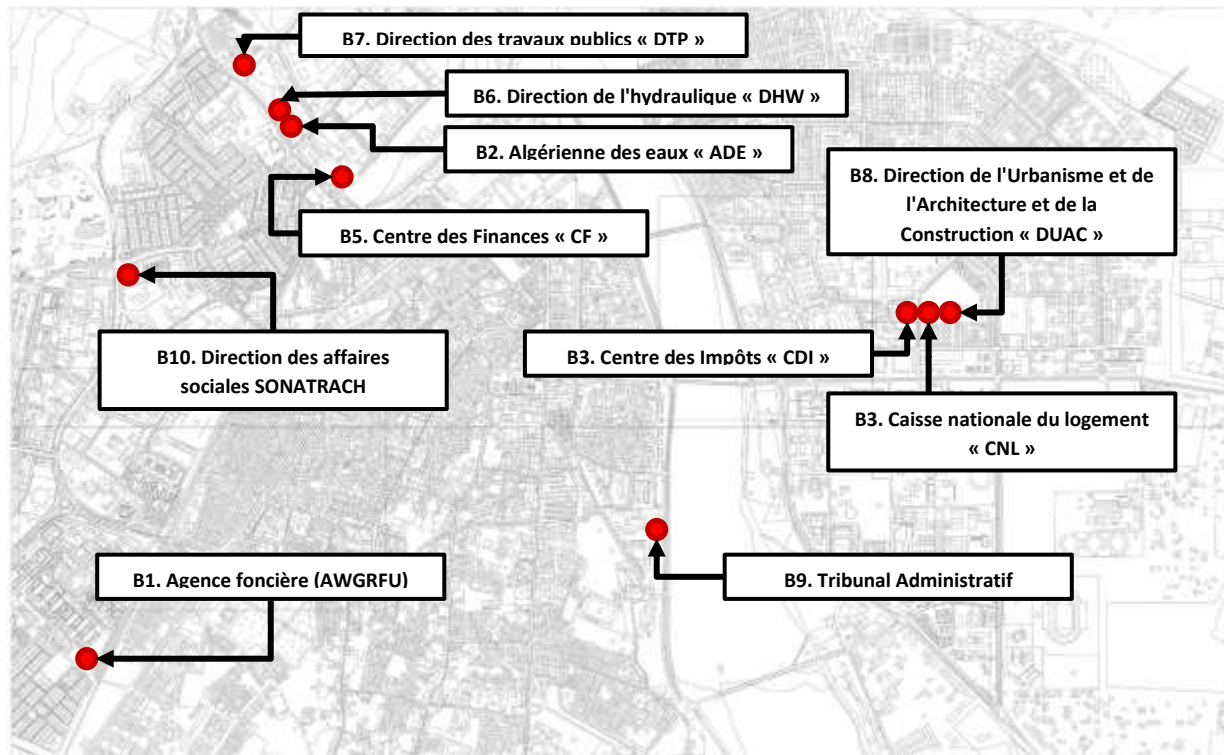


Figure IV.8. Localisation des bâtiments de bureaux choisis pour l'échantillon d'analyse

Ces bâtiments, présentant des orientations, des rapports d'aspect et des WWR différents, sont récemment construits (après l'an 2000) et fonctionnels, avec des actions de rénovation mineures ou nulles, et sont conformes aux normes de construction gouvernementales récentes.

IV.3.3.2. Critères d'analyse

L'analyse s'articule autour de la définition de l'aspect formel global de chaque bâtiment et des considérations spécifiques pour les aspects formels et constructifs de la façade. En détail, comme concrétisé dans le tableau IV.1, la forme globale du bâtiment définie par son rapport d'aspect, ses niveaux et ses orientations ont été évalués pour donner un bon aperçu de l'impact que ces considérations peuvent avoir sur son comportement énergétique. Plus spécifiquement, l'analyse minutieuse a dissocié les composants opaques et vitrés de la façade du bâtiment, ainsi que les solutions techniques d'ombrage, et a abordé leurs propriétés physiques en définissant des métriques spécifiques pour chaque composant.

Ces critères sont extraits de la partie conceptuelle de la recherche, et représentent les facteurs ayant le plus d'impact sur l'efficacité énergétique du bâtiment dans un climat chaud et sec, comme ils représentent les stratégies de conception passive de base pour évaluer et améliorer les performances des façades tout en tenant compte des attributs climatiques complexes du lieu.

Tableau IV.1 Critères d'analyse typologique adoptés pour les performances des bâtiments et les éléments de façade

Forme du bâtiment	Eléments de façade		
	Surfaces opaques	Surfaces vitrées	Protection solaire
• Coefficient de forme	• Stratification du mur	• Type de vitrage	• Type
• Orientation	• Couleur de la surface extérieure	• Revêtement (teinte)	• Fonctionnalité
• Surface et volume brute	• Approximation du coefficient	• Type de cadre	
• Consommation énergétique	• d'absorption solaire	• WWR global	
		• WWR des façades	
		• WWR de la salle de bureau	

Tableau IV.2. Analyse typologique de l'échantillon de 10 bâtiments de bureaux sélectionnés dans la ville de Biskra

ID	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	
Bâtiment	Agence foncière (AWGRFU)	Algérienne des eaux (ADE)	Caisse nationale du logement (CNL)	Centre des Impôts (CDI)	Centre des Finances (CF)	Direction de l'hydraulique (DH)	Direction des travaux publics (DTP)	Direction de l'Urbanisme de l'Architecture et de la Construction (DUAC)	Tribunal Administratif	Direction des affaires sociales SONATRACH	
Orientation (sur axe principal)	E/O	NO/SE	N/S	E/O	E/O	NO/SE	E/O	N/S	NO/SE	N/S	
Aperçu :											
* Façade principale											
*Direction Nord											
Ratio S/V	0.27	0.33	0.3	0.24	0.43	0.46	0.34	0.50	0.58	0.43	
Niveaux	R+2	R-1; R+3	R-1; R+3	R-1; R+3	R+1	R+3	R+3	R+2	R+1	R-2; R+2	
Surface de plancher brute (m²)	1978.6	1714.2	2374.8	4870.0	733.7	1614.4	2039.4	1990.6	1099.8	1795.7	
Volume brute (m³)	6727.1	5739.6	9689.26	18847.0	2751.5	5230.8	7627.4	7025.8	3563.3	6715.8	
Consommation globale d'énergie électrique dans les zones conditionnées et non conditionnées de l'année 2018 (kWh/m²y)	61.8	55.9	53.6	-	-	-	54.2	48.6	-	-	
WWR Global	25.6%	16.7%	21.9%	19.1%	17%	29.9%	38.8%	13.6%	24.9%	9.7%	
WWR pour chaque façade	Principale	43.4%	22%	24.8%	24.2%	20%	33.9%	48.9%	27.7%	30.8%	24.9%
	Postérieure	16.8%	25%	21.4%	15%	14.5%	25.9%	28.6%	10%	28%	9%
	Latérale droite	15.8%	9.8%	20.1%	20.1%	-	-	-	9.8%	21%	2%
	Latéral gauche	26.6%	9.8%	21.3%	17%	-	-	-	6.7%	19.8%	2.7%
Salle de bureau WWR (plage de variation)	36%	14%	Entre 32% - 41%	32% pour bureaux fermés	12% - 65%	35% - 56%	54% - 71%	16%	15% - 34%	15%	
Stratification des parois opaques	W1 (Figure IV.9)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Couleur	Blanc - Beige	Blanc	Beige	Beige	Blanc - Jaune	Beige - Blanc	Beige clair	Gris foncé	Beige	Beige
	Approx. Solar absorptance	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	0.50 - 0.70	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40
	W2 (Figure IV.9)	-	Partiel, Entrée, Hall et cage d'escalier	Entrée principale	Cage d'escalier	General	-	-	-	-	-
	Couleur	-	Bleu	Vert	Gris clair	Jaune / Grenant	-	-	Gris clair	-	-
Approx. Solar absorptance	-	0.70 - 0.80	0.50 - 0.70	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40 / 0.50 - 0.70	-	-	0.25-0.40	-	-	
Cadre	Aluminium	Bois - Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Bois - Aluminium	Aluminium	Aluminium	Bois - Aluminium	Aluminium	

Chapitre IV. Contexte de l'étude, choix du bâtiment de référence et présentation de la méthodologie d'analyse

Propriétés des fenêtres	Vitrage	Simple vitrage	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Double vitrage	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
Teinte		Réfléchissant - Gris	Clair / Réfléchissant - Bleu	Réfléchissant - Vert	Réfléchissant - Gris	Réfléchissant - Gris	Réfléchissant - Gris	Réfléchissant Miroir / Réfléchissant - Gris	-	Réfléchissant - Gris	Réfléchissant - Vert	Réfléchissant- Miroir
Solutions d'ombrage externe	Disponibilité	Minimal	-	-	-	-	-	Partiel	-	-	-	-
	Type	Mushrabiah	-	-	-	-	-	Brise-soleil verticaux et horizontaux	-	-	-	-
	Commentaires	Bâtiment entièrement découvert avec présence minimale de dispositifs d'ombrage limité aux Mushrabiahs	Entièrement découvert avec des ailettes verticales décoratives non fonctionnelles, des rideaux intérieurs et du papier utilisé pour l'ombrage intérieur	-	L'ombrage extérieur est minimal et partiellement impliqué par les éléments extrudés du bâtiment.	-	-	Brise-soleil verticaux et horizontaux en plus de l'ombrage impliquées par la géométrie du bâtiment.	-	-	Brise-soleil verticaux et horizontaux en plus de l'ombrage impliquées par la géométrie du bâtiment.	Brise-soleil décoratifs extrudés et en pergolas non calculés

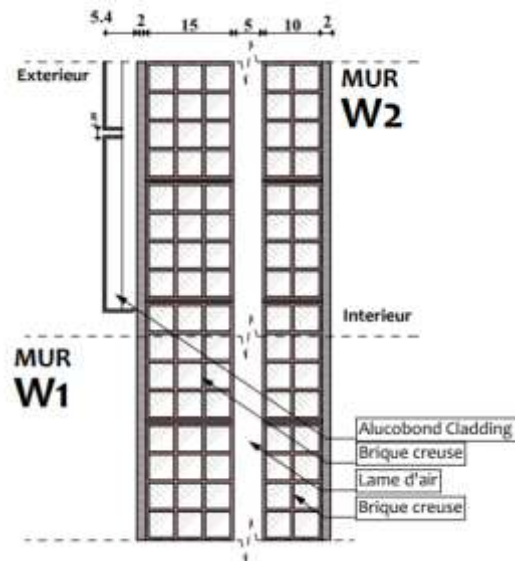


Figure IV.9. Stratification des murs observés dans les échantillons de bâtiments de bureau analysés

IV.3.3.3. Synthèse d'analyse : Définition du cas d'étude

a) *Forme du bâtiment, orientation et consommation d'énergie*

Le rapport surface/volume des bâtiments varie de 0,27 à 0,58, dont 5 sur 10 sont inférieurs à 0,35. Par conséquent, leur forme est considérée comme compacte, à l'exception du bâtiment DUAC (8) qui présente des surfaces exposées globales plus élevées.

En termes d'orientation, étant donné que les stratégies de conception recommandent une conception compacte des bâtiments avec une exposition minimale aux radiations solaires de l'Est et du Sud, seuls 3 bâtiments répondent à cette exigence, à savoir : B1, B4, B5 et B7. Les autres bâtiments présentent des orientations de façade défavorables, trop orientées vers le Est/Ouest ou le nord-est/sud-ouest.

En termes d'intensité de l'utilisation de l'énergie, la consommation d'énergie électrique pour le chauffage et le refroidissement, qui sont généralement fournis par des systèmes HVAC Air-air composés d'un système de climatisation split (variant dans les modèles et donc dans l'efficacité), l'éclairage et les équipements, présente une variation disproportionnée si l'on considère l'orientation et la compacité du bâtiment.

En détail, en considérant les données énergétiques acquises sur les bâtiments en ce qui concerne leurs zones conditionnées et non conditionnées, les données de consommation d'énergie globale, bien sûr, ne présentent pas de corrélation avec la forme du bâtiment ni avec son orientation. Dans le cas du DUAC par exemple, bien qu'il présente le même système constructif que les autres bâtiments, sa consommation d'énergie est bien inférieure. Ceci est principalement dû à d'autres paramètres d'impact relatifs aux paramètres d'exploitation du bâtiment. En effet, chaque bâtiment présente des horaires et des profils d'occupation différents, ainsi que des efficacités HVAC et des comportements d'utilisateurs différents.

Plus précisément, l'utilisation subjective du système HVAC indépendant pour chaque bureau entraîne des points de consigne instables. Par conséquent, bien que ces valeurs donnent une idée globale de la fonctionnalité du bâtiment, une évaluation plus détaillée de la consommation d'énergie dédiée à chaque entité consommatrice d'énergie est nécessaire pour définir la corrélation entre les paramètres influents et les besoins énergétiques correspondants.

Finalement, l'analyse des façades des bâtiments du corpus en termes de configuration formelle et matérielle-constructive et précisément la caractérisation de leurs parties opaques et vitrées, a permis d'aboutir aux constats suivants :

b) Surfaces opaques

- Construction des murs extérieurs : une stratification similaire des murs est adoptée pour l'ensemble de ces bâtiments, à savoir le mur de 30 cm à double paroi en briques creuses avec cavité, associé à des traitements de façade partiels consistant en un revêtement d'Alucobond, à l'exception du bâtiment B8, qui présente des façades entièrement revêtues d'Alucobond.
- Revêtement : Le revêtement de la surface extérieure est une texture lisse avec des profils de peinture clairs qui, convertis au coefficient d'absorption solaire EnergyPlus (qui est défini par la quantité de photons solaires absorbés en raison de la couleur de la surface) aurait une valeur approximative de 0,25 à 0,40. Néanmoins, un contraste est observé pour le revêtement alucobond qui, reflétant généralement l'identité du service administratif, se présente avec des couleurs plus sombres pouvant aller de 0,50 à 0,80, selon la couleur.

Ces caractéristiques peuvent être généralisées, car elles s'adaptent aux pratiques constructives récentes imposées par les normes de construction nationales.

c) Surfaces vitrées

- **WWR**
 - **WWR global et spécifique à la façade**

Différentes variations des formes de fenêtres et du taux d'ouverture total des façades sont observées pour les exemples étudiés, et la gamme va de la limite inférieure de 9,7% à 38,8%. En détail, pour les bâtiments dont le taux d'ouverture global est inférieur à 10%, c'est le cas de B10. Cependant, bien qu'il soit considéré comme une valeur très faible, le taux d'ouverture fractionné pour chaque façade ne correspond pas à leur orientation et à leur présentation. En fait, dans le cas de ce bâtiment, la façade principale, qui est orientée Ouest, est entièrement découverte avec des solutions de protection solaire non fonctionnelles et présente un WWR de presque 25%, principalement pour les bureaux.

Quatre bâtiments présentent un WWR global de 10% à 20%, à savoir dans l'ordre ; B8, B5, B2 et B4. Quant aux bâtiments dont le WWR est compris entre 20% et 30%, il s'agit de B3, B9 et B1. Enfin, 2 bâtiments (B6 et B7) présentent un taux d'humidité relative supérieur à 30%, le bâtiment DTP (B7) est celui qui présente le plus de surfaces vitrées parmi les exemples étudiés.

Pour la majorité de ces bâtiments, si l'on considère la fraction du taux d'humidité relative par rapport à chaque orientation de façade, on observe que les surfaces vitrées, essentiellement conçues sans dispositifs de protection solaire cohérents ou fonctionnels, sont présentées avec un taux d'humidité relative assez faible ou moyen, mais sans tenir compte de son adéquation avec chaque orientation pour le climat chaud et sec de Biskra. Cette considération est principalement imposée par la distribution et la fonctionnalité des espaces intérieurs, ainsi que par la configuration du terrain et la forme du bâtiment. Néanmoins, nous distinguons des cas insolites tels que "B7", où la présence relativement élevée de surfaces vitrées aurait un impact négatif sur la performance énergétique du bâtiment en raison de la surchauffe constante due au rayonnement solaire et de la perte de chaleur causée par le système de vitrage simple appliqué sur le système de mur rideau de la façade.

- **WWR des locaux de bureaux**

Cette mesure a été prise en compte en raison de l'intérêt marqué dans la littérature pour l'optimisation des locaux de bureaux, considérés comme les espaces les plus consommateurs d'énergie en termes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. L'évaluation de cette propriété physique à partir des échantillons analysés fournira une idée générale, et surtout une limite inférieure et supérieure à prendre en compte pour l'évaluation de l'impact du facteur WWR sur cet espace.

D'après les exemples analysés, le WWR spécifique des bureaux varie d'un bâtiment à l'autre, sans tenir compte de l'orientation de la façade, avec des valeurs moyennes allant de 12% à 71%. Par conséquent, il convient d'affirmer qu'il n'existe pas de règles générales pour la conception des fenêtres dans un tel contexte.

- **Paramètres des composants de la fenêtre**

Les fenêtres à simple vitrage non revêtu ou réfléchissant avec des cadres en bois ou en aluminium sont le type de vitrage généralement utilisé, avec une faible présence de systèmes de

double vitrage non performants appréciés dans les bâtiments B3 et B4, principalement appliqués sur les limites extérieures des halls et des escaliers.

Une telle configuration est pertinente d'un point de vue économique, bien que la sous-performance de ces types de verre associée à l'absence de systèmes d'ombrage dans un climat chaud et sec affaiblisse gravement la performance énergétique du bâtiment en permettant des gains et des pertes de chaleur indésirables. Compte tenu du régime intermittent de ces bâtiments, cette considération finit par altérer le confort intérieur des utilisateurs, ce qui a un impact important sur leur productivité.

d) *Protection solaire*

Comme indiqué dans les conclusions précédentes, les façades des exemples analysés sont entièrement exposées aux radiations solaires, et la géométrie du bâtiment n'offre qu'une protection partielle. Une telle approche peut protéger les surfaces opaques et vitrées à un certain moment de la journée ; cependant, elle ne fournit pas un système d'ombrage entièrement fonctionnel pour protéger ces zones des radiations solaires directes et diffuses intenses caractérisant le climat chaud et sec de Biskra.

IV.3.3.4. Sélection du cas d'étude représentatif

Nous pouvons conclure de cette analyse, que les immeubles de bureaux récents de la ville de Biskra partagent des systèmes constructifs similaires tels que les murs opaques, les types de fenêtres et les systèmes porteurs, tout en présentant des différences au niveau des aspects formels du bâtiment, en termes de S/V, WWR et orientation. Ces paramètres sont principalement soumis à la considération subjective du concepteur, et sont principalement imposés par certaines contraintes, telles que le terrain et les axes de définition du contexte environnant.

Ainsi, sur la base d'une méthode statistique simplifiée, le bâtiment "Algérienne Des Eaux (ADE)" a été sélectionné comme représentatif des bâtiments de bureaux de la ville de Biskra. En plus de partager le même système constructif et de se conformer aux niveaux des autres bâtiments et aux métriques moyennes représentant les aspects formels globaux, son positionnement isolé dans le contexte urbain et son orientation non avantageuse permettant une exposition constante au rayonnement solaire direct et diffus tout au long de la journée en font le sujet le plus pertinent pour

la portée de notre recherche. De plus, la prise en compte de ces bâtiments permettra une évaluation objective de l'impact des composants des façades sur la performance énergétique du bâtiment.

Le bâtiment représentatif ADE sera présenté plus en détail dans la section suivante, et servira de support pour le développement d'un modèle énergétique calibré approprié au développement de modèles énergétiques ciblés rapportant ses conditions limites et ses paramètres de fonctionnement pour la partie expérimentale de cette étude, développée dans les chapitres V et VI.

PARTIE 02 : Mise en place du cadre de la méthodologie expérimentale

Afin d'évaluer l'influence des aspects formels et constructifs de la façade sur la performance énergétique des bâtiments de bureaux dans la zone climatique chaude et sèche de l'Algérie, l'enquête a été menée à travers une séquence de simulations énergétiques paramétriques numériques.

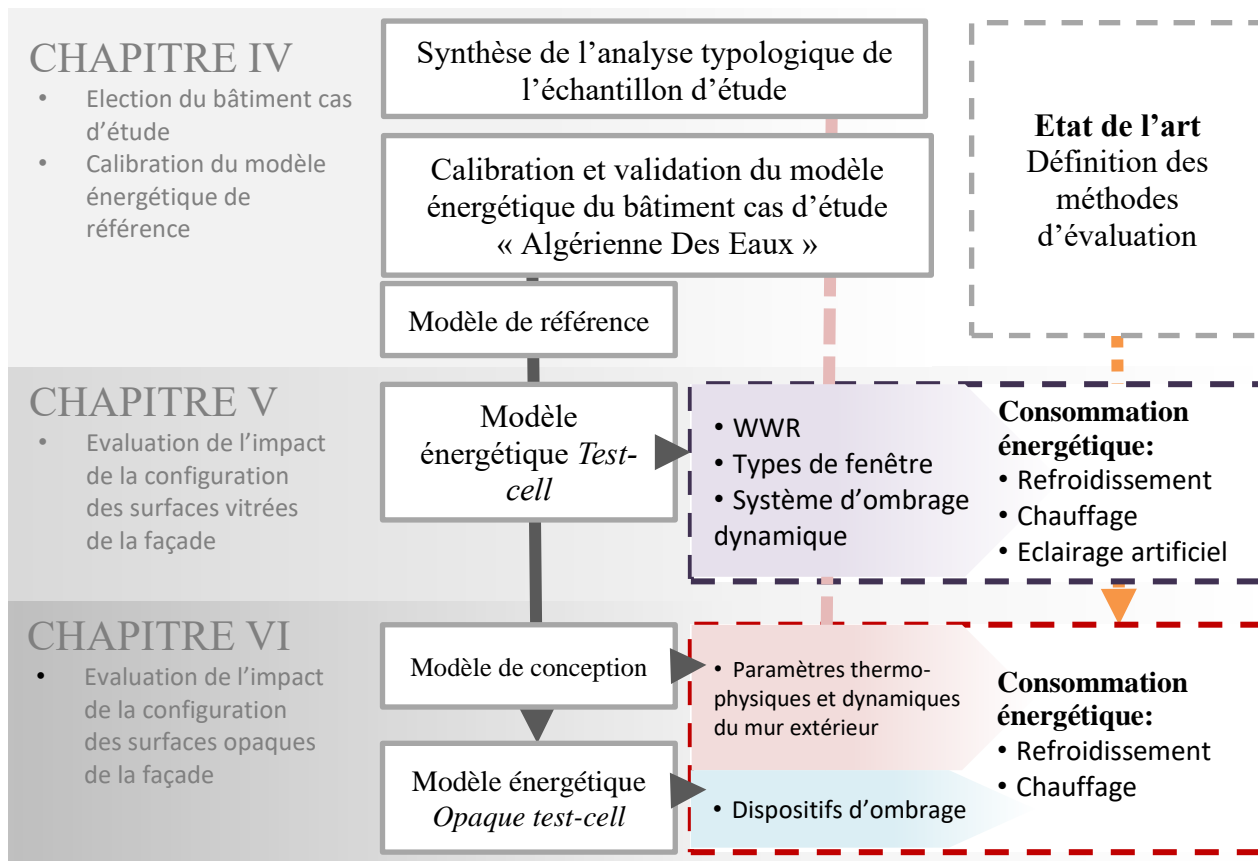


Figure IV.10. Organigramme de la méthodologie d'évaluation expérimentale

Comme schématisé dans la figure IV.10, une analyse bilatérale des différentes configurations des propriétés thermo-physiques et dynamiques de la surface opaque des façades du bâtiment, ainsi que des propriétés physiques, thermiques et optiques des surfaces vitrées est effectuée en tenant compte de l'effet de l'ombrage extérieur sur la consommation énergétique globale dédiée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage. Cela permet de produire un large éventail de résultats possibles en matière de performance énergétique, en tenant compte de manière réaliste de l'impact des conditions limites du cas d'étude, des conditions de fonctionnement variables et du comportement de l'utilisateur.

Ces considérations fourniront une compréhension générale du comportement des différents composants des façades, et permettront de définir des solutions optimales et de présenter des directives spécifiques par le biais de méthodes ciblées appropriées au contexte, qui serviront d'outil de base pour la prise de décision des stratégies de conception pour les nouvelles constructions et la rénovation des bâtiments.

Ces méthodes et les évaluations associées seront développées dans les chapitres V et VI, avec une étape précédente consistant au calibrage du cas d'étude qui sera abordé dans la section suivante. De plus, le logiciel Rhinoceros/Grasshopper et les plugins ladybug&honeybee tools serviront de plateforme de simulation énergétique paramétrique pour sa pertinence et sa précision dans le calcul de l'impact des différents composants des façades sur le comportement énergétique du bâtiment.

IV.4. La simulation paramétrique

Aujourd'hui, la simulation des performances d'un bâtiment, qui fait référence aux méthodes utilisées pour estimer et calculer avec précision les performances hypothétiques ou existantes de ses différents aspects, représente un atout évident pour la prise de décision. De plus en plus habitués à la tendance actuelle de la conception algorithmique ou paramétrique assistée par une large gamme d'outils disponibles, les architectes, les concepteurs et les ingénieurs exploitent les puissantes synergies de cette approche afin de répondre aux multiples objectifs contradictoires par le biais de résultats en temps réel d'approches holistiques prédéfinies.

Une large gamme d'outils est constamment développée pour répondre à des objectifs spécifiques d'analyse et d'optimisation des bâtiments, et beaucoup abordent leurs performances

thermiques, visuelles et énergétiques. Comme le champ d'application de notre recherche vise à la fois l'évaluation et l'optimisation des composants des façades de bâtiments tout en permettant une méthode itérative de force brute, le logiciel de modélisation Rhinoceros mondialement connu avec son interface algorithmique Grasshopper ont été choisis comme plateforme car ils permettent un paramétrage complet des différents composants implicites de la façade. De plus, afin de réaliser des simulations précises de l'énergie, de la lumière du jour et du rayonnement solaire, les plugins adaptés Ladybug&Honeybee ont été adoptés en raison de leur interconnexion avec le logiciel EnergyPlus approprié et validé au niveau international : ce dernier a prouvé son efficacité dans le calcul du bilan énergétique du bâtiment grâce à son calcul du flux thermique transitoire pour les simulations énergétiques de bâtiments entiers.

- ***Rhinoceros/Grasshopper et plugins Ladybug&Honeybee : un outil de simulation énergétique paramétrique potentiel***

Les simulations sont effectuées à l'aide de la plateforme paramétrique de Grasshopper (grasshopper3d, 2016) sur Rhinoceros (Robert McNeel & Associates, 2016), sous le processus démontré dans la figure VI.11. Grasshopper est un outil de script pour les outils de modélisation 3D sous Rhinoceros, un outil de modélisation 3D à forme libre.

Les plugins Ladybug et Honeybee de Grasshopper permettent de simuler la performance énergétique, le confort thermique intérieur et les conditions de lumière du jour (Sadeghipour Roudsari, 2016). Ladybug et Honeybee sont deux plugins open-source permettant, sous l'interface d'algorithmes graphiques de Grasshopper, d'analyser des conceptions respectueuses de l'environnement. Ladybug importe les fichiers météo EnergyPlus standard (.EPW) dans Grasshopper. Honeybee connecte Grasshopper à EnergyPlus, Radiance, Daysim.

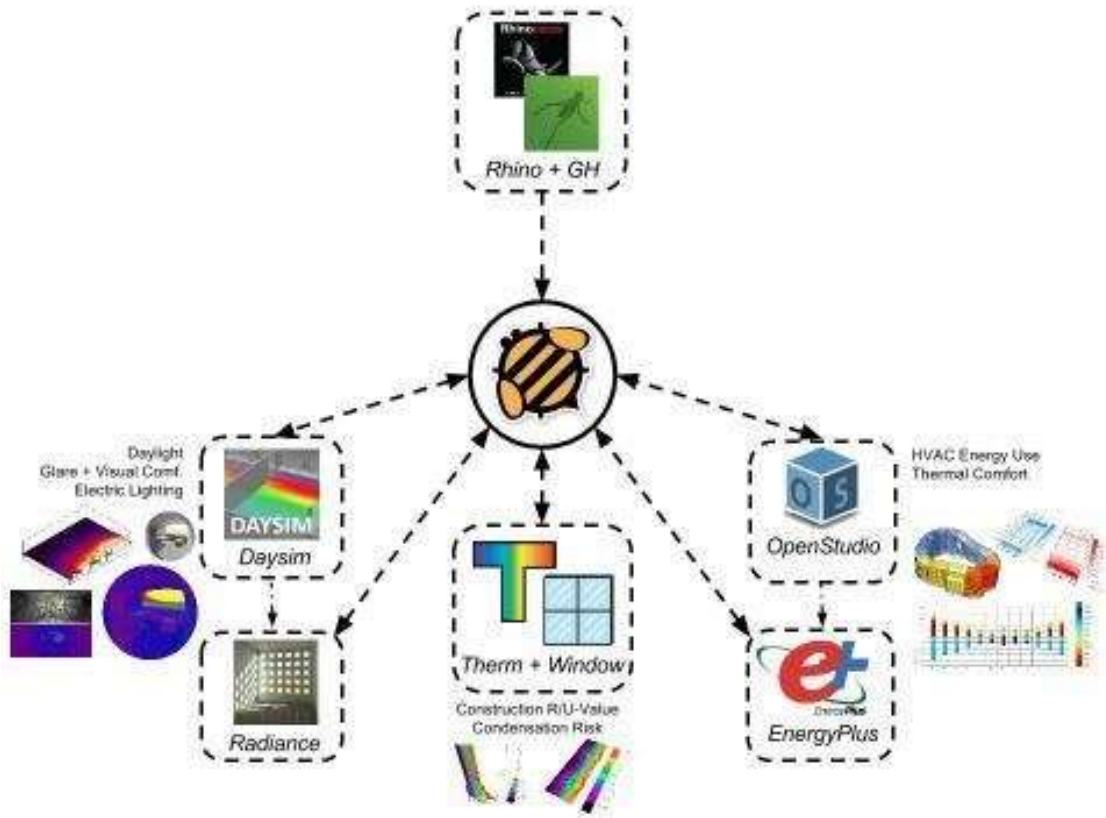


Figure IV.11. Hiérarchisation du processus de simulation énergétique avec les plugins environnementaux ladybug&honeybee dans l'outil paramétrique de Grasshopper

OpenStudio, qui est également utilisé pour la simulation de l'énergie du bâtiment et de l'éclairage naturel (Sadeghipour Roudsari, 2016). Il est basé sur EnergyPlus, un outil de simulation énergétique des bâtiments très utilisé pour calculer la performance énergétique, le confort thermique et la consommation d'eau (NREL, 2015). OpenStudio est un logiciel open source prenant en charge EnergyPlus et Radiance pour une simulation énergétique complète (NREL, et al., 2016). La calibration, présentée dans tous ces programmes, aide finalement à analyser la performance énergétique complète du bâtiment.

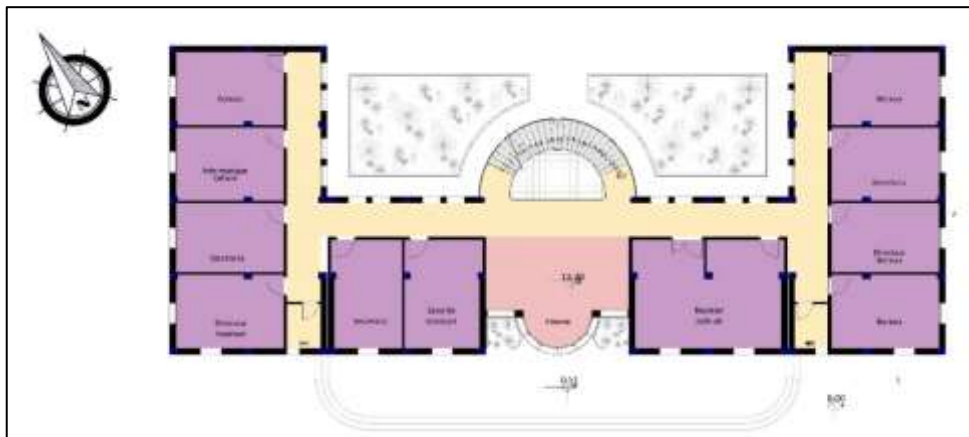
IV.5. Bâtiment cas d'étude : « Algérienne des eaux »

IV.5.1. Description

L'immeuble " Algérienne des Eaux " est situé dans la zone nord de la ville de Biskra (latitude 34.86, longitude 5.71, altitude 17.25 s.n.m.). Achevé de construire en juin 2006, il accueille principalement des fonctions administratives avec 40 salles de bureaux de : 5,3m de longueur et 3,7m de largeur, enserrées autour d'un couloir en " U " avec un hall central et une cage d'escalier commune. Ces compartiments sont divisés en 4 étages répétitifs typiques (hauteur respective, 4,25m pour le rez-de-chaussée, et 3,23m pour chaque étage supérieur), comme présenté dans la Figure IV.12 avec l'ajout d'un étage souterrain qui sert principalement d'entrepôt, pour une surface totale de 1714 m².



(a)



(b)

Figure.IV.12. Cas d'étude (a) Bâtiment "Algérienne des Eaux", (b) Plan d'étage type

Orienté à -32° Nord sur un axe nord-ouest/sud-est, l'enveloppe du bâtiment est constituée d'un toit plat en béton isolé avec des parpaings creux. Le mur extérieur, quant à lui, suit le système conventionnel du double mur de briques creuses avec cavité à lame d'air, soutenu par une structure porteuse de poteaux et de poutres en béton, pour un rapport total surface/volume de transfert de chaleur (S/V) de 0,33. Quant à la fenestration, elle est conçue avec des façades principales et arrière vitrées non protégées avec un rapport fenêtre/mur (WWR) de respectivement : 22% et 25,2% avec une couche transparente de 4mm avec des cadres en bois équipés de stores vénitiens internes comme dispositifs de protection solaire pour les salles de bureau, et des cadres en aluminium pour le couloir, et 2 façades aveugles.

Le tableau VI.4 rapporte la stratification des éléments de l'enveloppe et les propriétés thermo-physiques des matériaux constitutifs (sur la base des valeurs fournies par la Documentation Technique Réglementaire du Ministère de l'Habitat d'Algérie " D.T.R. C 3-2 ».

IV.5.2. Elaboration, calibration et validation du modèle énergétique

IV.5.2.1. Méthodologie

Le processus de calibration suit une approche de simulation. Ainsi, la capacité d'estimer et de quantifier de manière fiable les performances énergétiques du bâtiment dans des conditions climatiques et d'exploitation spécifiques et d'identifier ses propriétés dynamiques correctes (tissu de l'enveloppe, paramètres de contrôle et d'exploitation) tout en soulignant les capacités d'isolation efficace des éléments verticaux de l'enveloppe est indéniablement importante. Dans ce but, le modèle numérique a été développé, comme mentionné précédemment, sous l'interface paramétrique de Grasshopper (représentation 3D dans le viewport de Rhinoceros montré dans la figure IV.13, et a subi un processus de calibration suivant la " méthode de calibration du modèle énergétique du bâtiment entier ", une approche mondialement reconnue qui a été prouvée efficace dans des recherches précédentes (Raftery et *al*, 2011)

En conséquence, par rapport aux données mensuelles réelles, la directive ASHRAE 14-2002a été suivie pendant la calibration étape par étape et la validation déterminant correctement les écarts entre les valeurs de consommation d'énergie totale simulées et mesurées implique deux indicateurs d'erreurs sans dimension, les valeurs MBE et CV(RMSE) en utilisant respectivement les formules (1) et (2) :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i} \quad (1)$$

$$Cv(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} ((M_i - S_i)^2 / N_i)}}{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} M_i} \quad (2)$$

Où M_i et S_i sont les données respectives mesurées et simulées à l'instance i , et N_i est le compte du nombre de valeurs utilisées dans le calcul. Les chiffres du MBE fournissent une indication des erreurs moyennées par rapport à la moyenne des valeurs mesurées mais souffrent de l'effet d'annulation. L'indice CV(RMSE), quant à lui, est une mesure de l'erreur cumulée normalisée par rapport à la moyenne des valeurs mesurées. En tant que tel, le CV(RMSE) reflète plus fidèlement l'ampleur de l'erreur accumulée et constitue donc une meilleure mesure de la précision de prédiction globale du modèle.



Figure.IV.13 Vue 3D du modèle de bâtiment

Le processus de calibration est synthétisé dans les étapes suivantes.

IV.5.2.2. Collecte des données

IV.5.2.2.1. Données météorologiques personnalisées

Principalement, le fichier de données météorologiques a été adapté sur la base des données réelles surveillées acquises à partir de la station météorologique de " l'aéroport international Mohamed Khider de Biskra " se référant à l'enregistrement de l'année 2018 conformément à la période de mesure du bâtiment des données réelles de consommation d'énergie électrique fournies par la branche locale de la Société nationale d'électricité et de gaz (SONELGAZ). En outre, il convient de noter que l'électricité est le seul fournisseur d'énergie présent dans le bâtiment qui, outre l'alimentation des équipements et des charges d'éclairage, couvre toutes les charges de refroidissement et de chauffage des espaces.

Ensuite, les conditions géométriques et les conditions limites du bâtiment ont été définies conformément aux documents de conception originaux du bâtiment et mises à jour par des mesures sur site et des évaluations des utilisateurs après l'occupation. Plus précisément, les propriétés de l'enveloppe du bâtiment telles que construites et les entrées des éléments internes ont été introduites en suivant les normes de conception nationales (résumées dans le tableau IV.3).

Tableau IV.3 Paramètres thermo-physiques et d'exploitation du modèle énergétique du bâtiment

Categorie	Groupe	Type	Zone de référence	Unit	
Paramètres thermo-physiques	Enveloppe	U-value murs extérieurs		W/(m ² .K)	
		U-value murs intérieurs		W/(m ² .K)	
		U-value toit		W/(m ² .k)	
		U-value plancher inférieur (RDC)		W/(m ² .k)	
		U-value plancher intermédiaire		W/(m ² .k)	
		Solar absorption coefficient des surfaces exposées		-	
		Glazing : U-value SHGC		W/(m ² .k) -	
Opération du bâtiment	Activités (utilisation et occupation journalière présentée dans Fig. IV.11)	Charge d'équipement par zone (<i>a</i>)	Zone A1 - A2 (intermittent) Zone A3	W/m ² W/m ²	
		Densité d'éclairage artificiel par zone (<i>l</i>)	Zone A1 – A2 Zone A3	W/m ² W/m ²	
		Personnes par zone (<i>p</i>)	Zone A1 – A2 Area C	ppl/m ² ppl/m ²	
		Paramètres d'opération	Hset	Zone A1 – A2	°C
			Cset	Zone A1 – A2	°C

et de contrôle	ACH (infiltration and natural ventilation)	Zone A1 – A2 (intermittent schedule)	vol/h
		Zone A3 (intermittent schedule)	vol/h

Tableau IV.4 Propriétés thermo-physiques des composants de l'enveloppe du bâtiment

Composant de l'enveloppe	Couche de Construction (de la couche externe à la couche interne)	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m.K)
Mur extérieur	Mortier de ciment	1.5	1.4
	Brique creuse	10	0.5
	Lame d'air	5	0.45
	Brique creuse	15	0.5
	Mortier de plâtre	1.5	0.35
Mur intérieur	Mortier de plâtre	1.5	0.35
	Brique creuse	0.1	0.5
	Mortier de plâtre	1.5	0.35
Plancher intermédiaire	Carreau de granit	2	2.1
	Mortier de ciment	4	0.8
	Couche de béton	4	1.45
	Brique creuse	16	1.15
	Mortier de plâtre	1.5	0.35
Plancher inférieur	Carreau de granit	2	2.1
	Mortier de ciment	4	1.4
	Béton	10	1.45
	Couche de pierre	15	1.4
Toit	Mortier de plâtre	1.5	0.35
	Brique creuse	16	1.15
	Couche de béton	4	1.45
	Isolation en liège	4	0.44
	Forme de pente du mortier de ciment	4	1.4
	Couche d'étanchéite	3	0.04

IV.5.2.2.2 Propriétés des zones thermiques et paramètres de fonctionnement

Afin de définir des équipements fiables, des charges d'éclairage et des programmes d'occupation, des profils détaillés basés sur la fonction de l'espace ont été attribués spécifiquement à chaque zone thermique (Figure IV.14) sur la base de mesures et d'une enquête détaillée sur place, comme indiqué dans la Figure IV.15, conformément aux paramètres indiqués dans le Tableau IV.3.

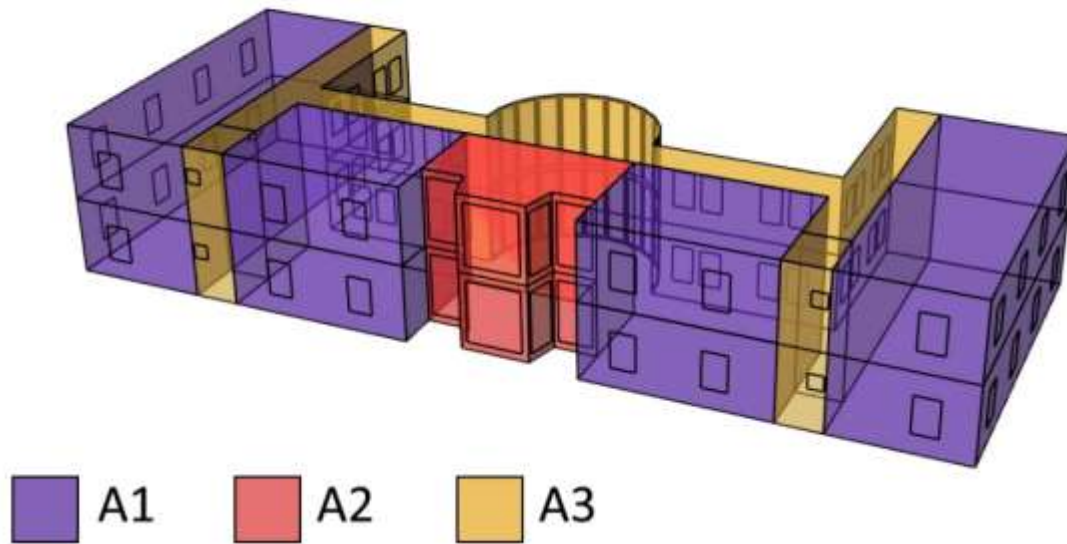


Figure IV.14 Définition des programmes de zones thermiques

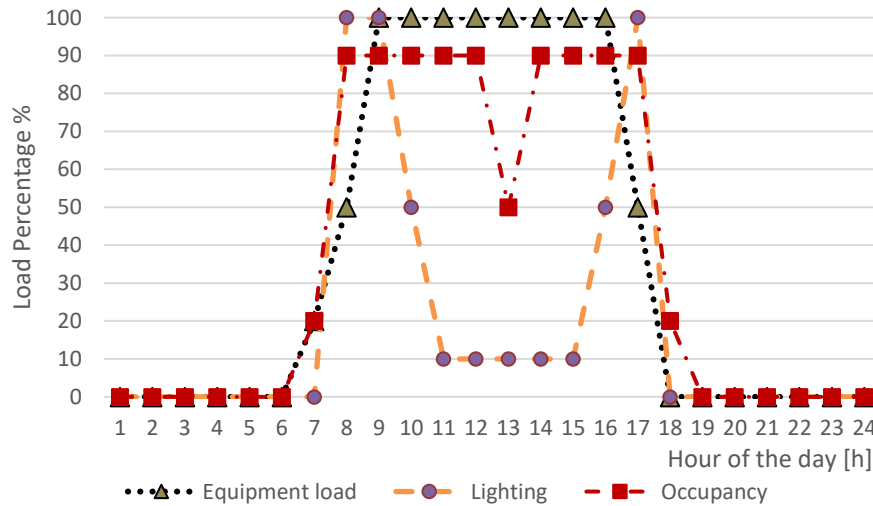


Figure IV.15 . Équipement, charges d'éclairage et programme quotidien d'occupation

IV.5.2.2.3. Modèle Théorique COP/EER du système HVAC

En ce qui concerne le système HVAC, un climatiseur sans conduit mini-split 18000BTU similaire avec un réfrigérant R22 fournit le chauffage et principalement le refroidissement pour chaque pièce de bureau (Zone " A1 ", voir Figure IV.14 et le hall central (Zone " A2 "). En détail, l'enquête post-occupation confirme que son utilisation pour le chauffage est plutôt minimale, d'abord en raison de

l'utilisation manuelle de ce système de climatisation, ce qui entraîne des set-points variables qui dépendent du comportement de l'utilisateur en raison de la mise en œuvre décentralisée caractéristique de l'équipement de ce système HVAC, et en raison des températures saisonnières chaudes caractérisant les climats chauds et secs. Par conséquent, un réglage fin basé sur une approche itérative simplifiée a été effectué afin d'éliminer les incertitudes sur les set-points réels de l'utilisateur.

Enfin, nous avons abordé les dernières divergences liées à l'efficacité du système HVAC en incluant un modèle théorique des paramètres de performance du système mini-split, car l'inexactitude des données finales est principalement due à des informations techniques incorrectes. À cet égard, comme le COP et l'EER sont fortement affectés par la température de l'air extérieur, une carte de performance a été développée sur la base du modèle théorique élaboré par Ounis et al, 2022. Les attributs finaux sont affichés dans la figure IV.16.

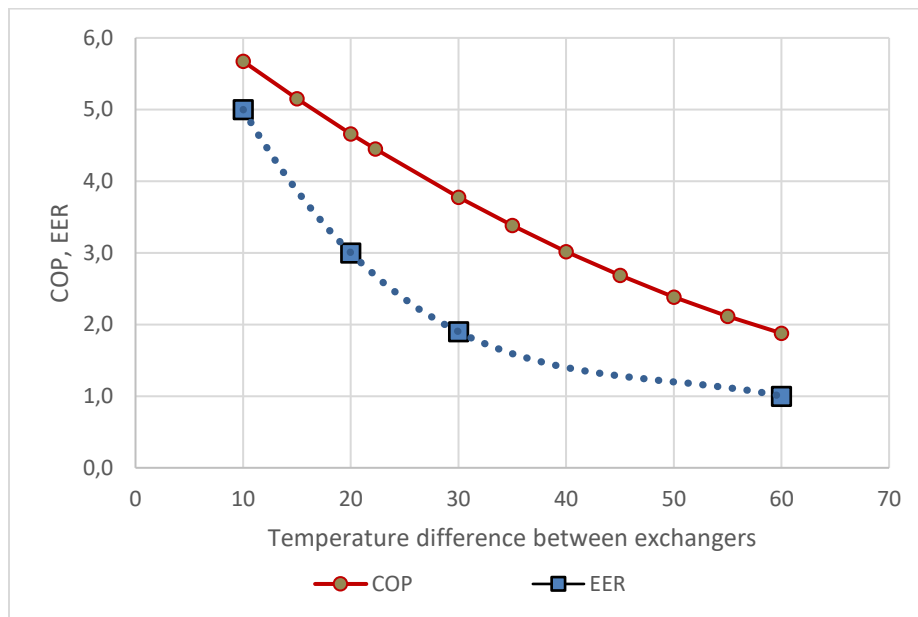


Figure IV.16 . Modèle théorique des attributs variables du COP et de l'EER des systèmes de climatisation split

IV.5.2.2.4 Validation

Un algorithme a ensuite été développé pour mettre à jour les résultats énergétiques horaires résultants en consommation mensuelle finale d'énergie électrique en comparaison avec les données de consommation réelles mesurées, comme présenté à la figure IV.17.

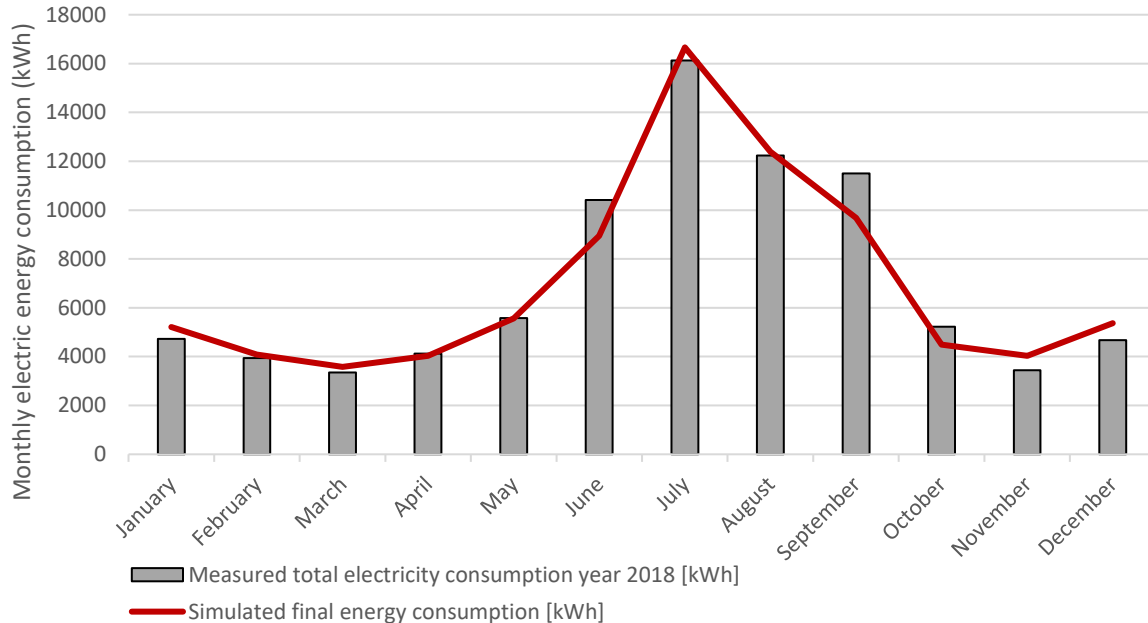


Figure IV.17. Consommation énergétique totale mesurée et simulée pour le modèle de bâtiment calibré

Après la comparaison finale entre les limites de seuil pour la calibration du modèle avec le protocole ASHRAE 14, les valeurs de MBE mensuel = 1,53% et CV(RMSE) =11,09% ont été atteintes, confirmant ainsi la cohérence et la fiabilité des résultats obtenus en termes de performance énergétique.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré, en premier lieu, à l'analyse du contexte de l'étude, que ce soit en termes de conditions climatiques ou de production architecturale et pratiques constructives relatives aux bâtiments de bureaux. La ville de Biskra étant représentative du climat chaud et sec de l'Algérie, elle a été sélectionnée pour servir de cadre à l'étude. L'objectif de cette première partie consistait à établir une connaissance de base sur les différents aspects formels et constructifs des

bâtiments de bureaux relativement récents, et aussi de sélectionner un cas d'étude représentatif pour servir de référence à un modèle énergétique calibré. Enfin, un cadre méthodologique devant servir à l'évaluation et l'optimisation des composants des façades, a été élaboré.

L'analyse climatique de la ville de Biskra a mis en exergue la prégnance des hivers courts et froids et des étés longs et extrêmement chauds. Elle a également révélé que les températures moyennes saisonnières étaient généralement au-dessus de la zone de confort. Compte tenu de ces conditions climatiques sévères et bien que différentes stratégies puissent être appliquées, la protection contre les radiations solaires directes et diffuses intenses, est de la plus haute importance.

L'analyse des immeubles de bureaux, pour sa part, a permis de relever des problèmes liés à un mode conceptuel aléatoire et inadapté à son contexte. Ainsi, en plus de l'utilisation excessive du vitrage, quelques matériaux particulièrement appréciés ont des impacts négatifs sur le plan thermique (l'acier et l'aluminium au niveau de la double peau et les cadres des ouvertures). Le recours aux façades transparentes avec des ratios d'ouvertures (WWR) relativement élevés et des orientations inadéquates, des systèmes de vitrage peu performants et une absence générale de dispositifs de protection solaire, ont entraîné le recours systématique et la dépendance totale des bâtiments vis à vis des systèmes de conditionnement d'air (HVAC) pour assurer des niveaux acceptables de confort. De plus, en ne comptant que sur l'ombrage minimal assuré par la géométrie des bâtiments, ces édifices présentent un risque général de surchauffe pendant les longues périodes chaudes en raison des gains solaires relativement élevés associés à l'incapacité des bâtiments à dissiper les gains internes élevés qui caractérisent ces immeubles.

Grâce à la synthèse de l'analyse prospective typologique, réalisée sur la base de visites sur site et de documents graphiques, le bâtiment "Algérienne Des Eaux (ADE)" a été sélectionné comme cas d'étude. Ce choix a été arrêté après avoir réuni un corpus constitué de 10 bâtiments de bureaux présélectionnés dans la ville de Biskra. Ce corpus ayant été examiné selon des critères précis, il est apparu que les caractéristiques du bâtiment de l'ADE étaient les plus représentatives de l'ensemble. En tant que bâtiment de référence, les métriques et attributs relevés relatives au WWR et aux matériaux de construction seront utilisées pour la définition des variables dans la partie expérimentale de cette recherche.

La deuxième partie du chapitre a prédéfini le cadre de méthodologie de l'étude paramétrique par simulation. Pour ce faire, la plateforme paramétrique Rhinoceros/Grasshopper, assistée des plugins environnementaux Ladybug&honeybee, a été adoptée comme outil potentiel pour les simulations énergétiques ultérieures. En outre, pour les besoins de l'analyse, un modèle énergétique calibré du bâtiment ADE a été établi sur la base de la méthode "Whole building energy calibration", afin de réduire les écarts entre les résultats de consommation d'énergie mesurés et simulés. Suite à ce travail préliminaire, les évaluations de l'impact des configurations des surfaces vitrées et opaques et des solutions d'ombrage sur la performance énergétique du bâtiment, seront réalisées et discutées dans les chapitres V et VI.

Chapitre V

Impact des propriétés des surfaces vitrées et du système d'ombrage sur l'efficacité énergétique

CHAPITRE V. Impact des propriétés des surfaces vitrées et du système d'ombrage sur l'efficacité énergétique

V.1. Introduction

Ce chapitre décrit la partie expérimentale et le processus d'évaluation et d'optimisation paramétrique consacrée aux surfaces vitrées de la façade en vue d'améliorer la performance énergétique du bâtiment. Autrement dit, cette partie de l'analyse s'intéresse à l'aspect matériel-constructif relativement à la composante vitrée de la façade. Dans cette optique, l'étude paramétrique du modèle énergétique calibré s'appuie sur l'analyse d'une cellule-test virtuelle représentant un bureau-type du bâtiment cas d'étude. Le protocole expérimental est fondé sur l'utilisation d'un système d'ombrage dynamique actionné par un algorithme de contrôle de l'ensoleillement et combiné en parallèle à un module de régulation automatique de l'éclairage artificiel et devant assurer le confort visuel. Le but est de mettre en exergue le comportement thermique des composants des surfaces vitrées et de définir la meilleure combinaison du ratio d'ouverture (WWR), type de fenêtre et configuration de système d'ombrage par rapport à diverses orientations de façade.

V.2. Elaboration du protocole expérimental

La surface vitrée de la façade étant un élément central dans les interactions visuelles et thermiques du bâtiment avec l'environnement extérieur, elle est désignée comme un moyen de faire entrer aussi bien la lumière que le rayonnement solaire dans un espace et de permettre tant l'éclairage naturel que le gain de chaleur (ASHRAE 2017). Sachant que la quantité de rayonnement solaire pénétrant à travers la surface vitrée peut être divisée en lumière visible et en chaleur (Bokel et al, 2007), l'intensité de ce rayonnement varie en fonction de l'orientation de la façade et donc de la fenêtre, de sa géométrie, du système de contrôle solaire considéré et de ses propriétés physiques (Sayadi et al, 2021). Ainsi, l'orientation et les dimensions de la fenêtre, en fonction de la course du soleil, définissent la quantité de rayonnement solaire incident. Mais, cette quantité est également déterminée par les propriétés physiques du vitrage. Ainsi :

- Des valeurs de transmission thermique (U_g) plus élevées augmentent les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été et, par conséquent, augmentent la consommation d'énergie dédiée aux systèmes de chauffage et de refroidissement.
- Des valeurs de SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) plus élevées du vitrage réduisent les besoins en chauffage, qui par conséquent, augmentent également les besoins en refroidissement
- Une meilleure transmission de la lumière visible (V_t) signifie un environnement mieux éclairé en journée, et donc moins de temps d'activation de l'éclairage artificiel, mais peut impliquer un inconfort dû à un éventuel éblouissement. De plus, cet aspect présente un effet mitigé ; en effet, bien que l'augmentation des gains internes implique une diminution des besoins de chauffage, cela présente aussi des effets négatifs dans les périodes de refroidissement.
- Les systèmes de contrôle solaire, en fonction de leur configuration et de leur position, affectent le niveau d'éclairement intérieur et le gain de chaleur (Alawadhi et al., 2016).

Le schéma illustré par la figure V.1, souligne le caractère interdépendant des attributs physiques de la fenêtre sur la consommation d'énergie du bâtiment consacrée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage artificiel.

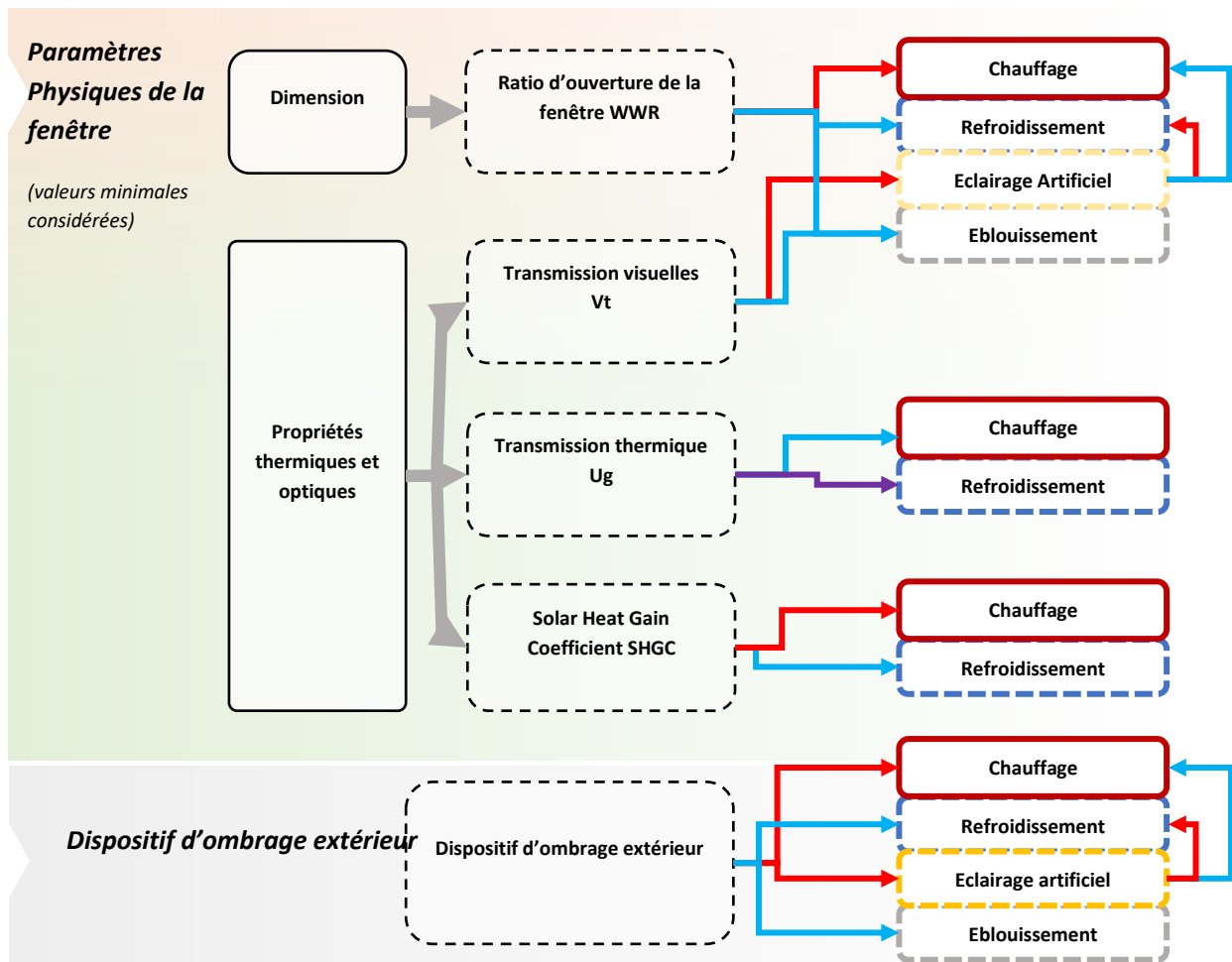


Figure V.1. Impact des composants physiques et des systèmes d'ombrage sur la consommation énergétique

Pour évaluer l'effet des paramètres physiques de la composante vitrée et du système d'ombrage selon les orientations cardinales, un protocole expérimental a été élaboré. Pour commencer, une cellule-test virtuelle "Test cell model" représentant un bureau-type du bâtiment cas d'étude a été modélisée par ordinateur. Ensuite des simulations sont effectuées pour évaluer son fonctionnement d'un point de vue énergétique tout en prenant en considération le confort visuel et le contrôle de l'éblouissement comme contraintes de base. À cet effet, le calcul de l'utilisation de l'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage artificiel est effectué au moyen de simulations énergétiques dynamiques via OpenStudio et d'un algorithme de contrôle spécifique sur Grasshopper.

De manière plus détaillée, l'évaluation est effectuée par une méthode d'optimisation par itération sur un ensemble de fenêtres se distinguant par différentes caractéristiques : de ratios

d'ouverture (WWR), de paramètres thermiques et optiques du verre, du système d'ombrage, tout en envisageant diverses possibilités d'orientation, pour aboutir à un total de 600 scénarios.

L'objectif de cette étude paramétrique présente un double intérêt : d'une part, elle permet une analyse comparative d'une multitude de scénarios qui sont autant de combinaisons des attributs physiques de la fenêtre et des systèmes d'ombrage, et d'autre part, elle permet de définir la configuration optimale des surfaces vitrées en fonction de chaque orientation considérée, ce qui offrira des lignes directrices pour la conception de bâtiments de bureaux performants dans le cas des climats chauds et secs en Algérie.

V.3. Paramètres de simulation

V.3.1. Configuration du modèle énergétique :

L'analyse énergétique a été réalisée en considérant le modèle de référence virtuel "*Test cell model*" basé sur la géométrie de la salle de bureau typique en référence au modèle énergétique du cas d'étude en grandeur réelle calibré et validé, comme démontré dans la figure V.2. En outre, les murs adiabatiques attribués aux espaces adjacents, le double mur avec cavité et l'absorptivité solaire de 0,4 de la finition extérieure sont caractéristiques du "*Reference model*". Une telle base permettra une évaluation objective des bureaux et donc de la zone thermique la plus consommatrice d'énergie du bâtiment pour chaque orientation considérée. Il est à noter que la présente méthode a été validée et vérifiée dans plusieurs études publiées dans la littérature, et que les résultats obtenus peuvent être considérés comme fiables. En outre, afin d'éliminer la subjectivité d'utilisation du système HVAC, une valeur de 20° et 26° ont été assumés pour les set points pour le chauffage et refroidissement selon EN 15251 (2007).

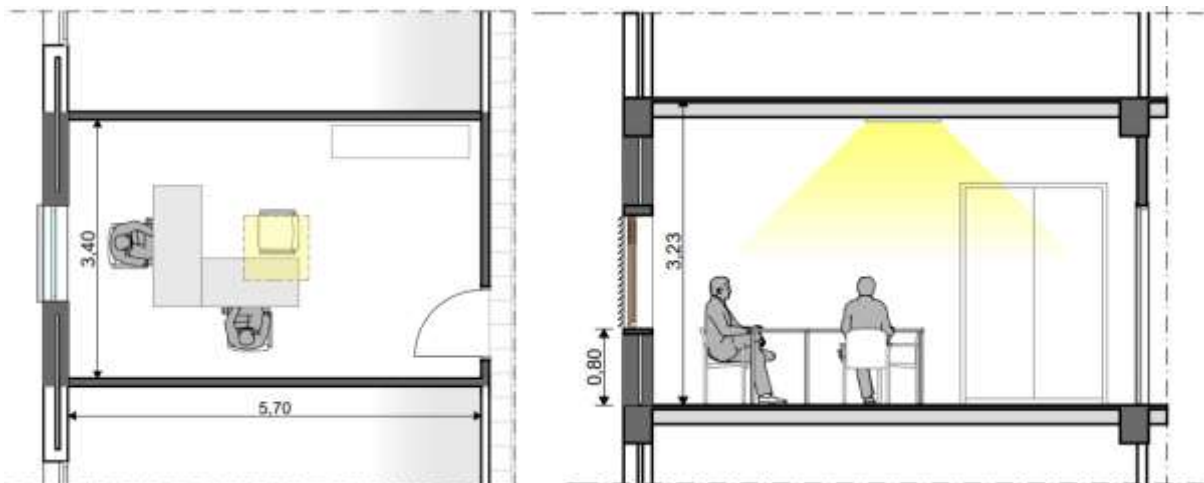


Figure V.2. Dimensions et configuration du modèle *Test-cell*

Le tableau V.1 ci-dessous présente les conditions limites du modèle énergétique et les paramètres de fonctionnement utilisés dans l'optimisation.

Tableau V.1 : Paramètres thermo-physiques et conditions limites du modèle énergétique

Catégorie	Groupe	Type
Paramètres thermos- physiques	Enveloppe	U-value mur extérieur
		U-value toit
		U-value plancher
		Solar absorption coefficient des surfaces externes exposées
		Vitrage : U-value
		SHGC
Paramètres d'opération du bâtiment	Activités (utilisation quotidienne et profil d'occupation dans Fig. IV.11)	Charge d'équipement (a)
		Densité d'éclairage artificiel (l)
		Personnes par zone (p)
	Paramètres de contrôle et d'opération	Hset (EN 15251 :2007)
		Cset (EN 15251 :2007)
		ACH (infiltration et ventilation naturelle)

V.3.2. Paramètres inputs des composants de la fenêtre

V.3.2.1. Types de fenêtre

En plus du vitrage simple « *Clear coat* » monté avec des cadres en bois correspondant au bâtiment existant du cas d'étude (G0), 4 autres types de fenêtres (G1, G2, G3 et G4) avec différents paramètres thermiques et optiques ont été adoptés à partir de la recherche de Aste et al, 2018 en référence aux composants de fenêtres du marché avancé, comme présenté dans le tableau V.2. Ces systèmes de vitrage présentent une variation de l'Ug (se référant à la fois au verre et au cadre), du SHGC et du Tv présents dans les fenêtres conventionnelles du marché.

Tableau V.2: Propriétés thermiques et optiques des systèmes de fenêtres considérées

ID	Fenêtre	Ug [W/m ² K]
G0	Vitrage simple - couche transparente (cas d'étude)	5
G1	Double vitrage standard	1.5
G2	Double vitrage à haute performance	1.1
G3	Double vitrage haute performance + contrôle solaire	1.1
G4	Triple vitrage + contrôle solaire	0.7

V.3.2.2. Rapport fenêtre-mur (WWR)

En référence aux recherches récentes menées sur des climats chauds et secs similaires (Badeche et *al.*, 2020), et sur la base de la synthèse rapportant les pratiques de construction dans le contexte de l'étude, on assume une surface de fenêtre variable par rapport à la surface de la façade de la cellule d'essai (11m²). Le WWR varie de 15% à 75% avec un incrément de 15%, concluant en cinq WWR, respectivement égaux à 15%, 30%, 45%, 60% et 75%, tout en gardant une hauteur minimale d'appui de fenêtre de 1m, comme présenté dans la figure V.3.

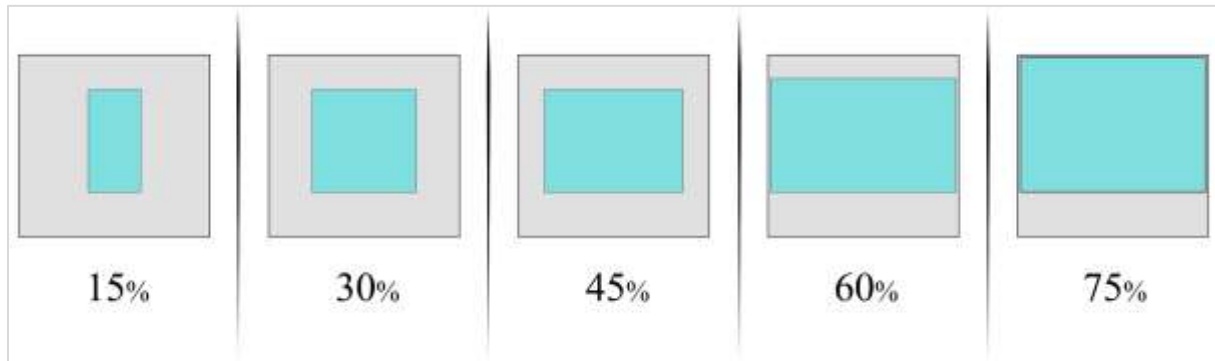


Figure V.3: Ratios d'ouverture (WWR) considérés pour la façade de la cellule test

V.3.2.3. Orientation

Initialement, quatre orientations ont été considérées lors de l'évaluation en rapport avec les orientations des façades du cas d'étude, à savoir : nord-est (32°), sud-est (121°), sud-ouest (212°) et nord-ouest (302°), le nord étant considéré comme la référence pour un angle de 0°. Une autre étude, parallèle à la précédente, a été menée en considérant d'autres orientations en référence aux points cardinaux et semi-cardinaux.

V.3.2.4. Système de protection solaire

Afin d'étudier l'effet du système de protection solaire sur l'efficacité énergétique du modèle énergétique, deux scénarios ont été envisagés : premièrement, nous avons proposé le *Test cell model* tel qu'il est construit dans le cas d'étude, sans protection solaire, et deuxièmement, nous avons appliqué un système de protection solaire à la surface du vitrage.

Sur la base d'une étude antérieure réalisée par Aste et al. (2017), des dispositifs d'ombrage externes ont été adoptés car ils constituent la solution la plus rentable (cost-optimal solution). En détail, nous avons considéré des stores vénitiens externes en aluminium mobiles (les caractéristiques sont reprises de la même recherche car elle se réfère aux stores mobiles conventionnels et sont rapportées dans le tableau V.3) assistés par un algorithme de rotation dynamique des lamelles. Le système d'actionnement est déclenché et un angle optimal des

lames (allant de 0° à 180° avec un incrément de 15°) est adopté lorsque deux conditions de contrôle sont remplies :

- Condition 1 : En cas du dépassement du seuil de rayonnement solaire direct et diffus sur la surface verticale.

Afin d'évaluer le seuil optimal, nous avons considéré un ensemble de valeurs allant de 100 à 450 W/m^2 avec un incrément de 50 W/m^2 , conduisant en 7 valeurs, qui sont donc : 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 et 450 W/m^2 .

- Condition 2 : si la valeur acceptable de l'indice d'éblouissement d'inconfort (DGI) de 27 est dépassée, soit la valeur maximale spécifique aux exigences de confort visuel au-delà de laquelle la sensation d'éblouissement devient insupportable (Huang et al., 2012).

Un exemple d'algorithme de contrôle mis en œuvre dans le composant OpenStudio de Honeybee par le biais de "chaînes supplémentaires" est présenté comme suit :

Une condition de fond pour l'éclairage artificiel, un système de régulation avec un algorithme de contrôle a été adoptée pour garantir un niveau d'éclairement minimum de 300 lux. Au-delà de cette valeur, l'éclairage artificiel est atténué graduellement

Plusieurs recherches antérieures ont étudié l'impact des dispositifs de protection solaire sur la consommation d'énergie des immeubles de bureaux dans le cas de climats chauds et secs (Badeche et *al.*, 2020). Cependant, peu d'entre elles ont considéré l'effet d'une protection solaire dynamique avec des systèmes de contrôle par capteurs/action, et aucune n'a considéré son impact global sur le chauffage, le refroidissement et l'éclairage artificiel en ce qui concerne les exigences d'éclairage du lieu de travail et le contrôle de l'éblouissement.

Tableau V.3. Propriétés des stores vénitiens extérieurs

	Propriétés physiques	C. de reflexion [-]	0.7
		C. d'émission [-]	0.1
	Dimensions des lamelles	Largeur [cm]	7.3
		Distance entre les lamelles [cm]	7
		Distance par rapport à la fenêtre [cm]	5

V.4. Résultats et discussion

Dans cette section, nous rapportons et analysons les résultats obtenus à partir du processus d'optimisation itératif en considérant les types de fenêtres, le rapport fenêtre-mur et les scénarios d'ombrage pour chaque orientation considérée en termes d'intensité de la consommation d'énergie annuelle (EUI) dédiée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage artificiel. Afin d'optimiser le processus d'analyse, l'évaluation est divisée en 3 étapes successives appliquées pour chaque scénario d'orientation (orientations des cas d'étude, et points cardinaux et semi-cardinaux)

- Premièrement, nous évaluons le seuil de déclenchement optimal en termes de rayonnement solaire incident par rapport au rapport WWR et au type de fenêtre en considérant chaque orientation.
- Deuxièmement, nous analysons les résultats pour les deux configurations : avec solution optimale avec ombrage dynamique et sans ombrage.
- Troisièmement, nous établissons une analyse comparative entre ces deux configurations afin de définir le potentiel d'économie d'énergie pour chaque cas.

V.4.1. Évaluation du seuil d'actionnement optimal :

V.4.1.1. Orientation du cas d'étude

- Nord-Est (58°)

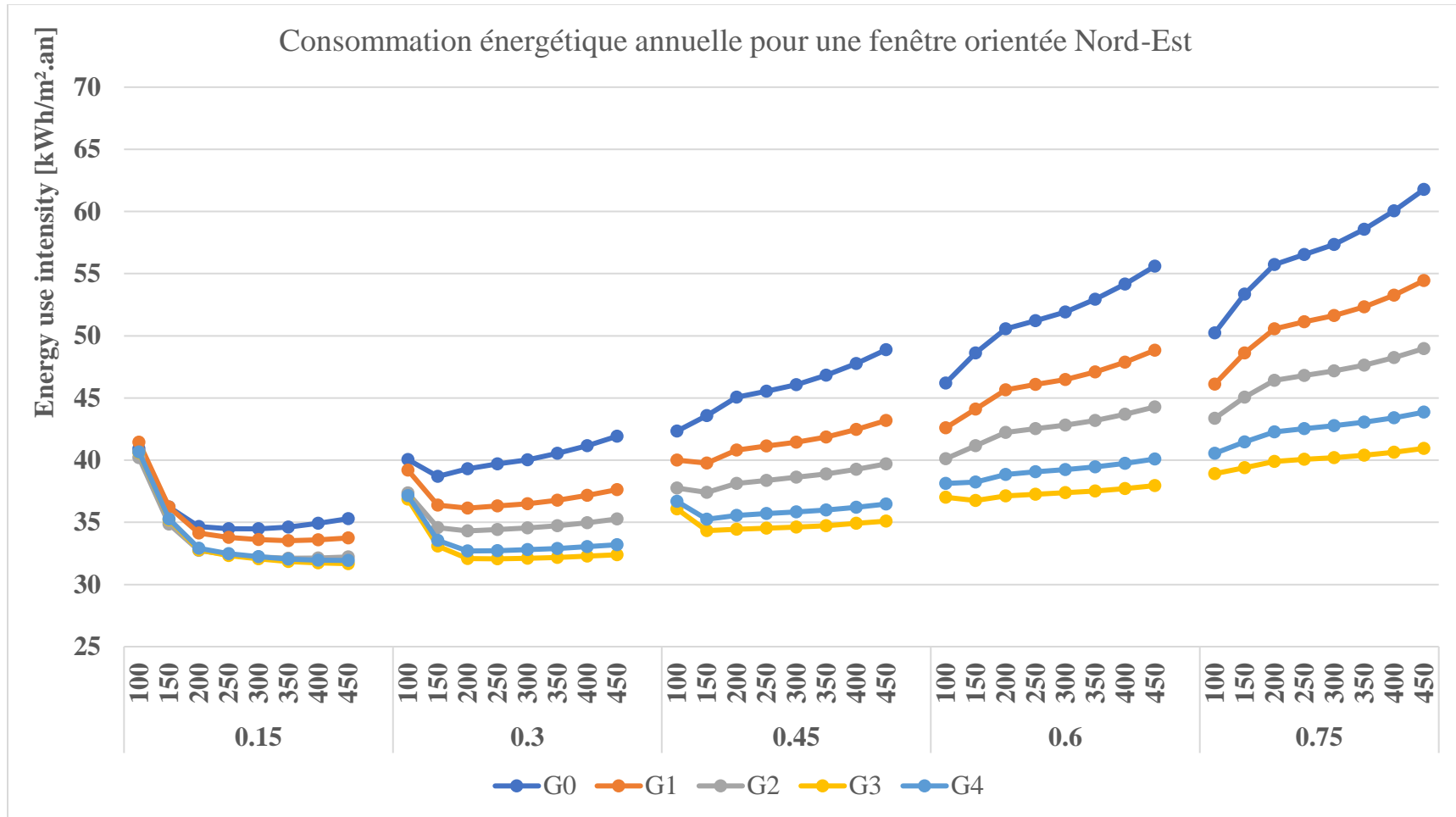


Figure V.4. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Nord-Est

- Sud-Est (148°)

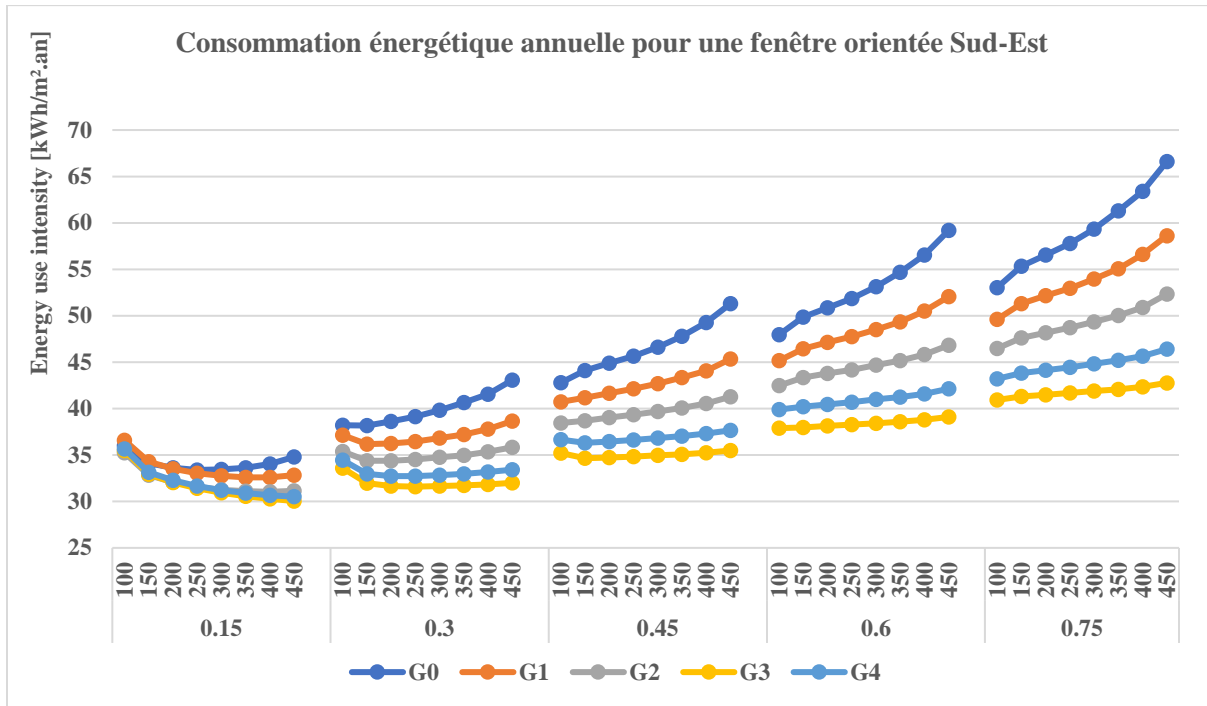


Figure V.5. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Sud-Est

- Sud-Ouest (238°)

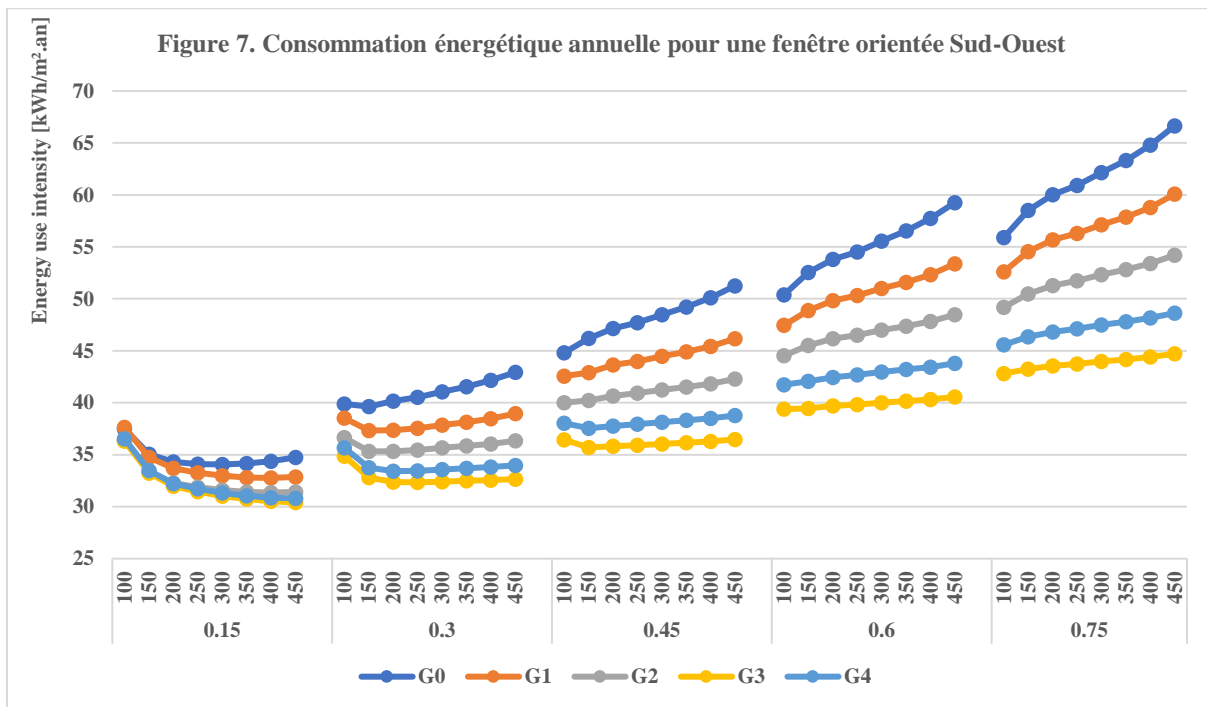


Figure V.6. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Sud-Ouest

- Nord-Ouest (328°)

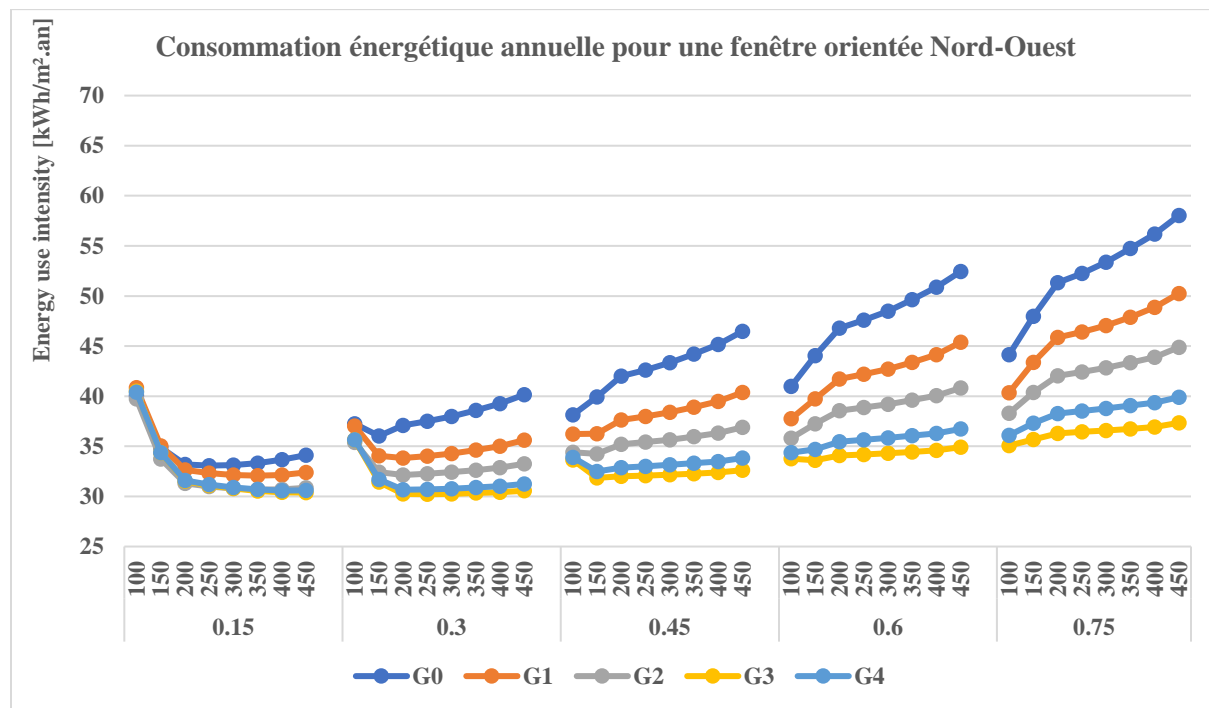


Figure V.7. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Nord-Ouest

Les figures (V.4, V.5, V.6 et V.7) présentent les résultats de la simulation énergétique itérative multiparamétrique pour la simulation préliminaire visant à élire le seuil de déclenchement optimal du système de stores vénitiens extérieurs dynamiques. Les résultats présentent la consommation d'énergie totale annuelle par surface des 5 systèmes de vitrage considérés en termes de variation du rapport WWR pour chaque orientation de façade du bâtiment cas d'étude.

Nous pouvons conclure, à partir de l'analyse des résultats, que la consommation d'énergie globale diffère en fonction de la configuration de la protection solaire, du rapport WWR et du type de fenêtre, avec G3 comme solution optimale de vitrage et G0 comme scénario le plus défavorable. De plus, la consommation d'énergie augmente avec des surfaces d'ouverture de fenêtre plus élevées pour chaque fenêtre. En outre, comme prévu, une solution économe en énergie pour chacun des paramètres introduits précédemment est atteinte à un niveau spécifique de rayonnement solaire admissible à travers la protection solaire, et les solutions optimales sont représentées dans le tableau V.4.

Des déductions similaires ont été obtenues à partir des résultats pour les points cardinaux et sub-cardinaux présentés dans la section suivante, et en conséquence, le tableau V.5 avec le seuil optimal d'activation de l'ombrage est défini.

Tableau V.4 : Seuil d'activation du système d'ombrage dynamique en fonction du rayonnement solaire incident (W/m^2) pour le cas d'étude

WWR [-]	Type de la fenêtre	Nord-Est (58°)	Sud-Est (148°)	Sud-Ouest (238°)	Nord-Ouest (328°)
0.15	G0	300	250	250	250
	G1	350	400	400	350
	G2	350	400	400	350
	G3	450	450	450	450
	G4	400	450	450	400
0.3	G0	150	150	150	150
	G1	200	150	150	200
	G2	200	150	200	200
	G3	250	250	250	250
	G4	200	200	200	200
0.45	G0	100	100	100	100
	G1	200	100	100	100
	G2	150	100	100	150
	G3	150	150	150	150
	G4	150	150	150	150
0.6	G0	100	100	100	100
	G1	100	100	100	100
	G2	100	100	100	100
	G3	150	100	100	150
	G4	100	100	100	100
0.75	G0	100	100	100	100
	G1	100	100	100	100
	G2	100	100	100	100
	G3	100	100	100	100
	G4	100	100	100	100

V.4.1.2. Points cardinaux et semi-cardinaux

- Nord (0°)

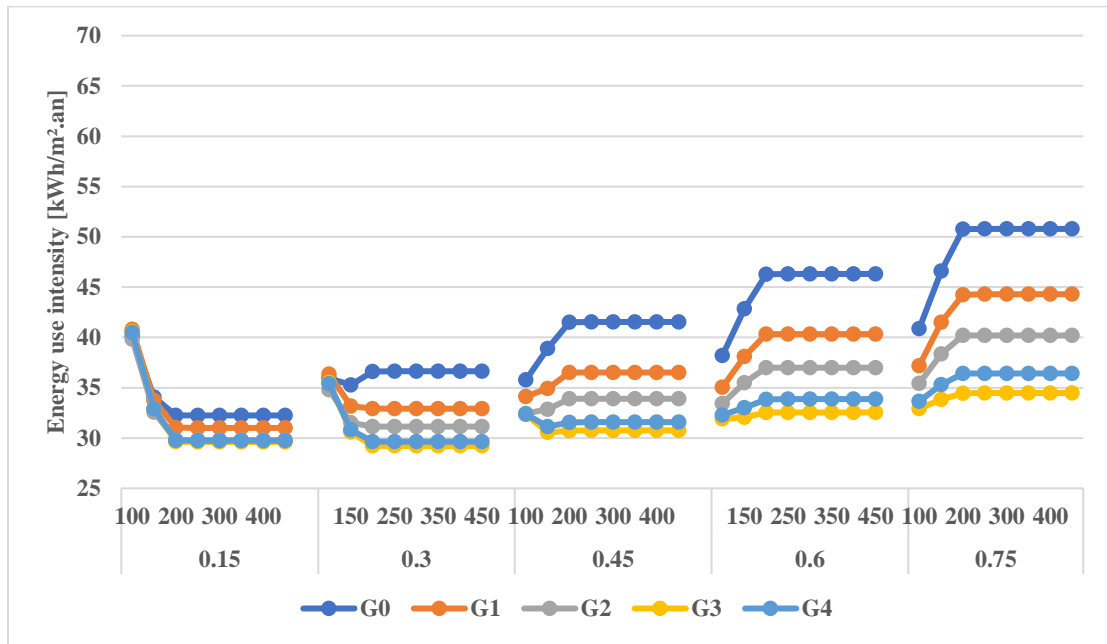


Figure V.8. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Nord

- Nord-Est (45°)

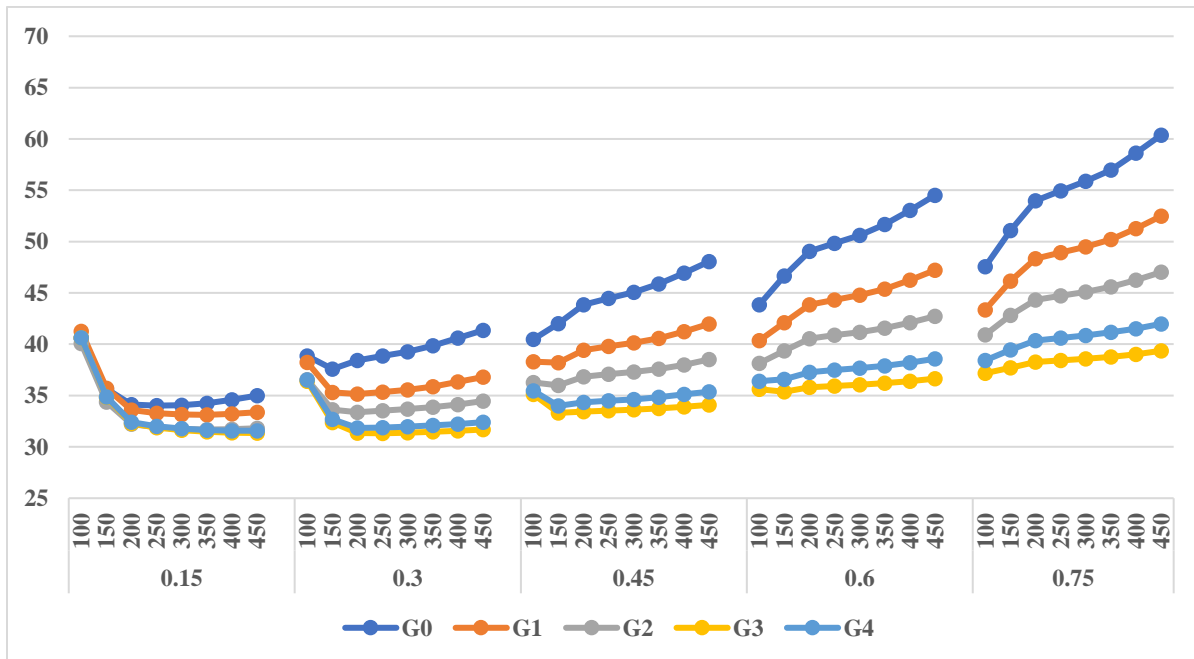
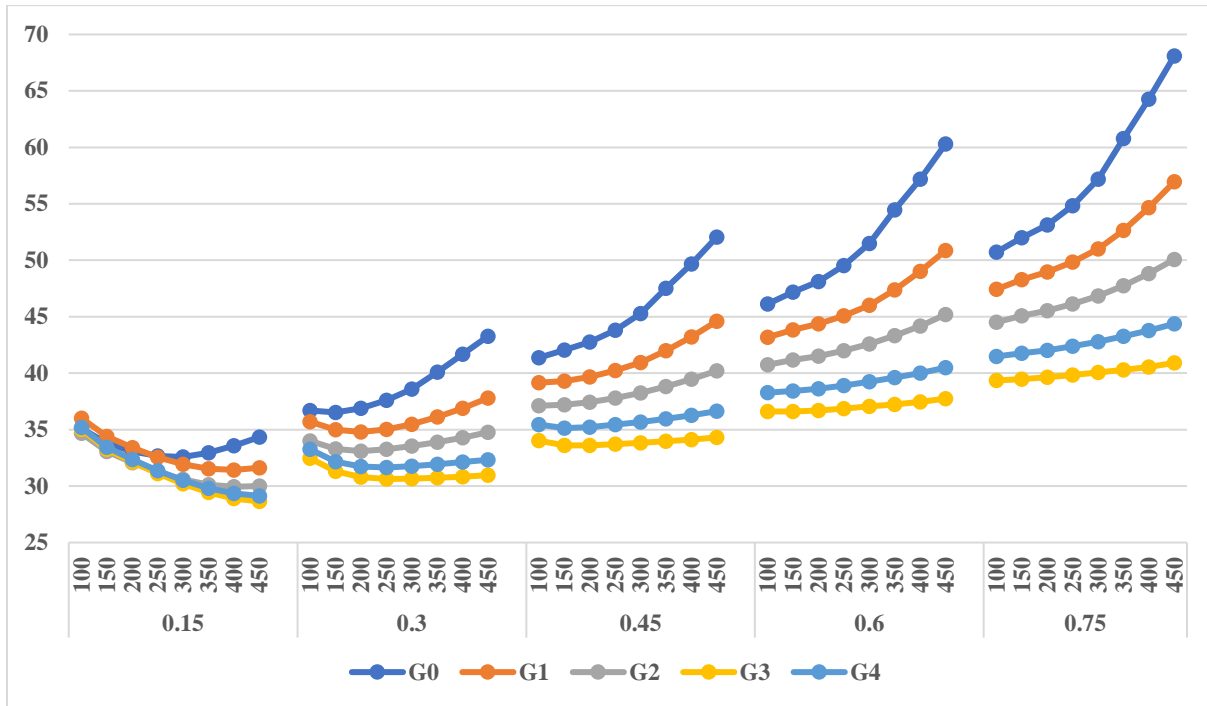


Figure V.9. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Nord-Est

• Est (90°)



FigureV.10. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Est

• Sud-Est (135°)

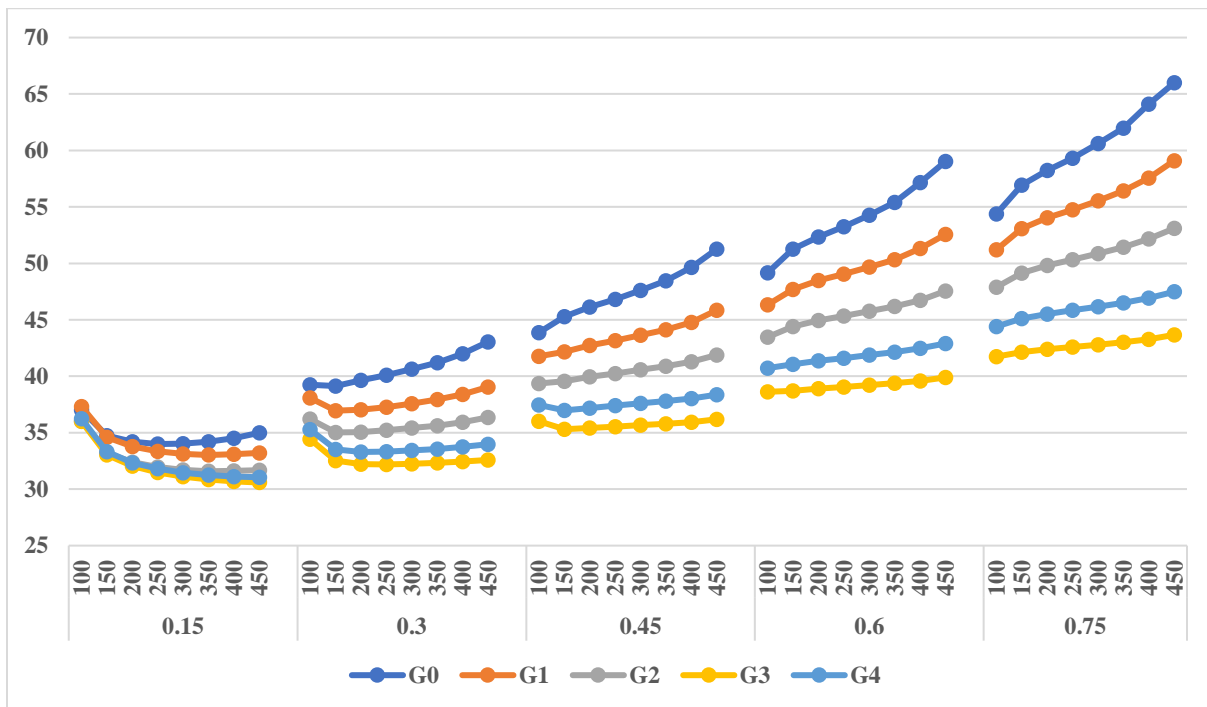


Figure V.11. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Sud-Est

• **Sud (180°)**

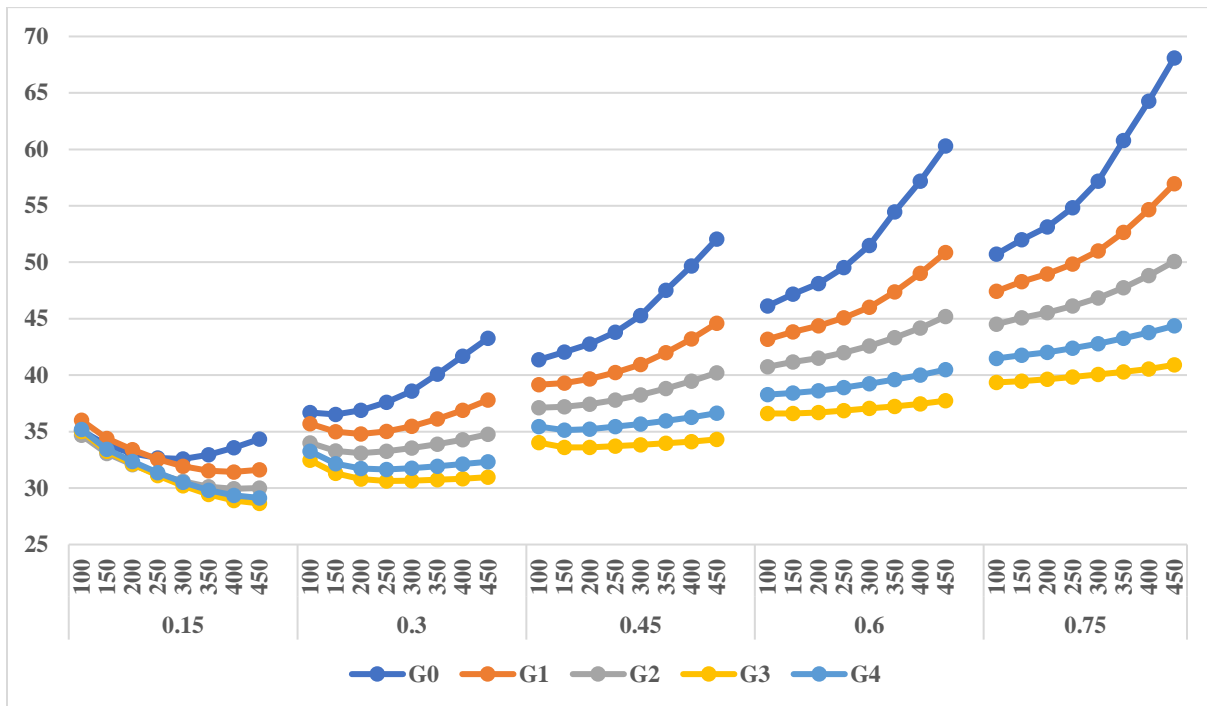


Figure V.12. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Sud

• **Sud-Ouest (225°)**

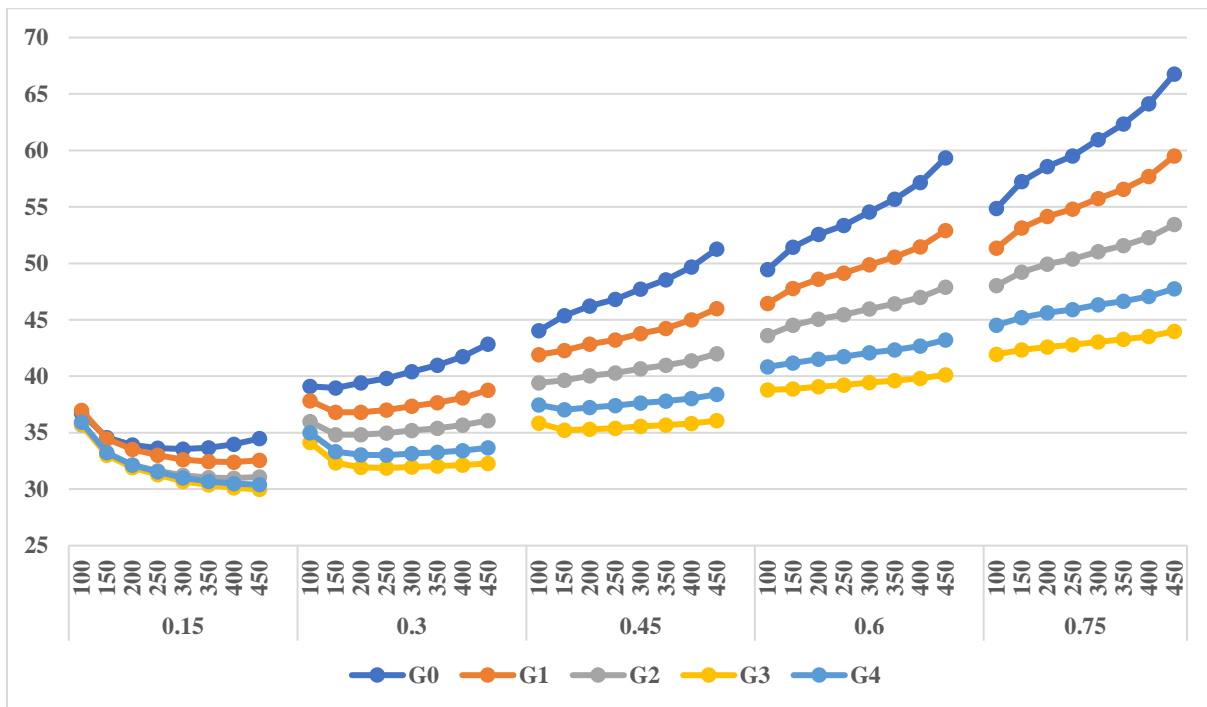


Figure V.13. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Sud-Ouest

• Ouest (270°)

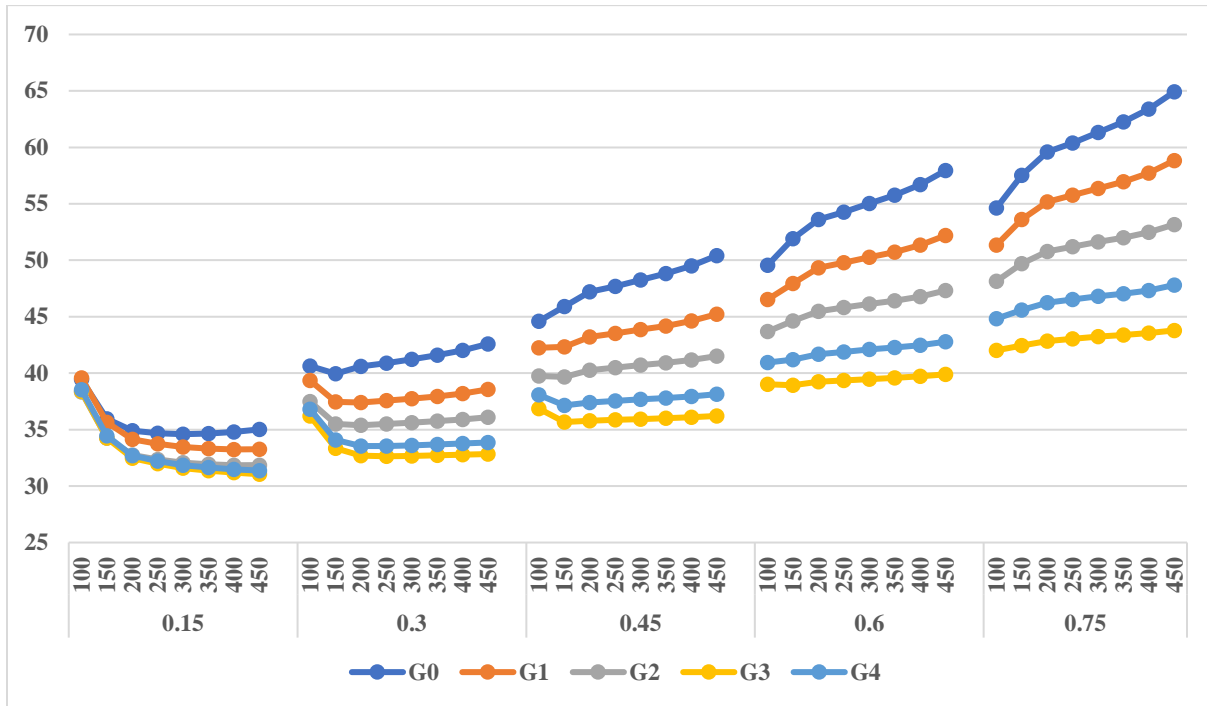


Figure V.14. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Ouest

• Nord-Ouest (315°)

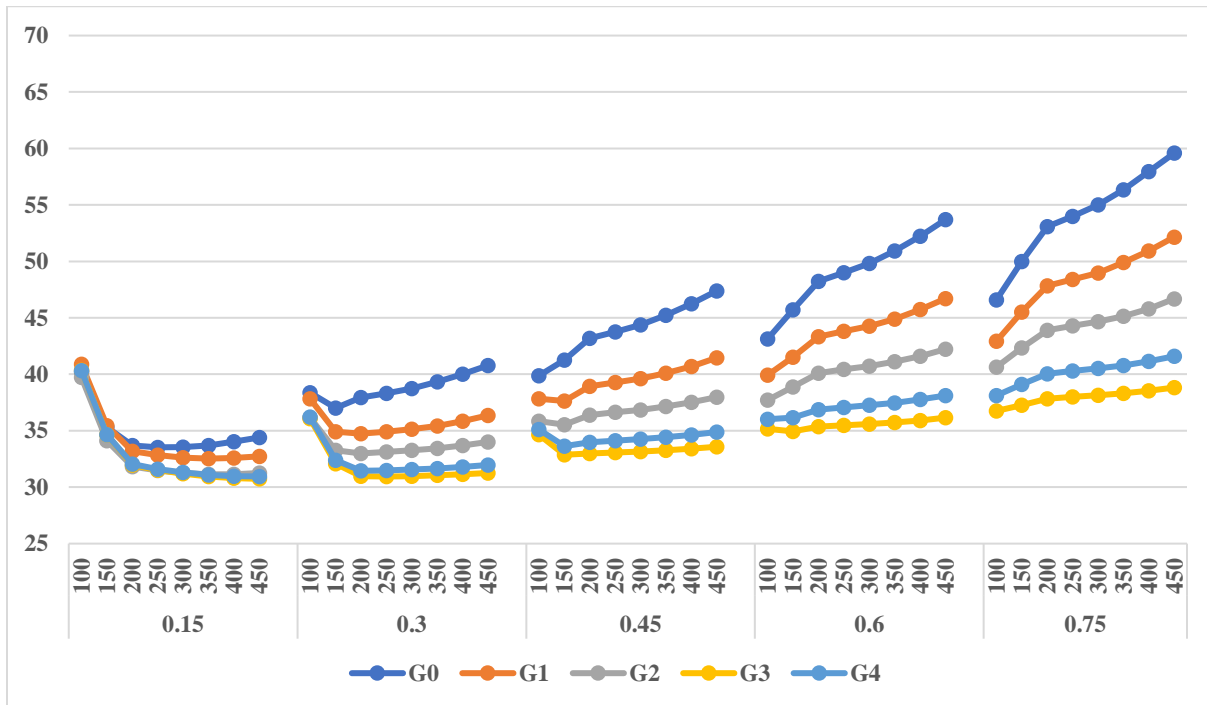


Figure V.15. Consommation énergétique annuelle pour une fenêtre orientée Nord-Ouest

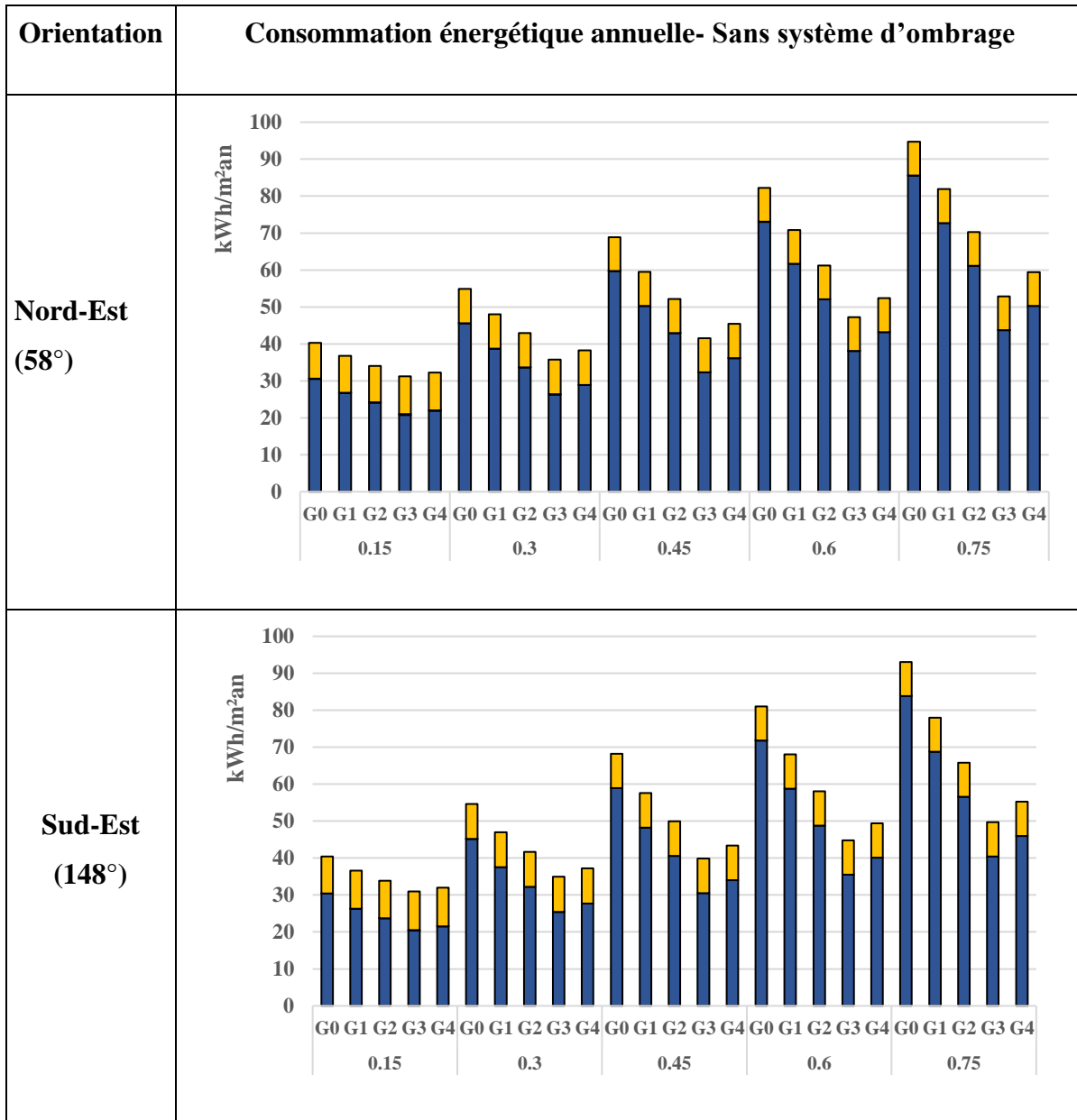
Tableau V.5 : Seuil d'activation du système d'ombrage dynamique en fonction du rayonnement solaire incident (W/m^2) pour les points cardinaux et secondaires

WWR [-]	Type de la fenêtre	Nord (0°)	Nord-Est (45°)	Est (90°)	Sud-Est (135°)	Sud (180°)	Sud-Ouest (225°)	Ouest (270°)	Nord-Ouest (315°)
0.15	G0	450	250	300	250	300	300	300	250
	G1	450	350	400	350	400	400	450	350
	G2	450	350	400	350	400	400	450	350
	G3	450	450	450	450	450	450	450	450
	G4	450	400	450	450	450	450	450	450
0.3	G0	150	150	150	150	150	150	150	100
	G1	150	200	200	150	200	150	200	200
	G2	200	200	200	150	150	200	200	200
	G3	450	250	250	250	250	250	250	250
	G4	450	200	250	200	250	250	200	200
0.45	G0	100	100	100	100	100	100	100	100
	G1	100	150	100	100	100	100	100	150
	G2	100	150	100	100	100	100	150	150
	G3	150	150	150	150	150	150	150	150
	G4	150	150	150	150	150	150	150	150
0.6	G0	100	100	100	100	100	100	100	100
	G1	100	100	100	100	100	100	100	100
	G2	100	100	100	100	100	100	100	100
	G3	100	150	150	100	150	100	150	150
	G4	100	100	100	100	100	100	100	100
0.75	G0	100	100	100	100	100	100	100	100
	G1	100	100	100	100	100	100	100	100
	G2	100	100	100	100	100	100	100	100
	G3	100	100	100	100	100	100	100	100
	G4	100	100	100	100	100	100	100	100

V.4.2. Impact du type de fenêtre et du rapport WWR :

Les résultats suivants évaluent l'impact de différentes surfaces vitrées définies par leurs paramètres physiques et le rapport WWR sur la demande d'énergie finale en termes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel, en tenant compte de l'ensemble du bilan énergétique du modèle énergétique de la "cellule test" ainsi que des rendements des systèmes techniques, sans considérer l'application de systèmes d'ombrage pour chaque orientation.

V.4.2.1. Cas d'étude



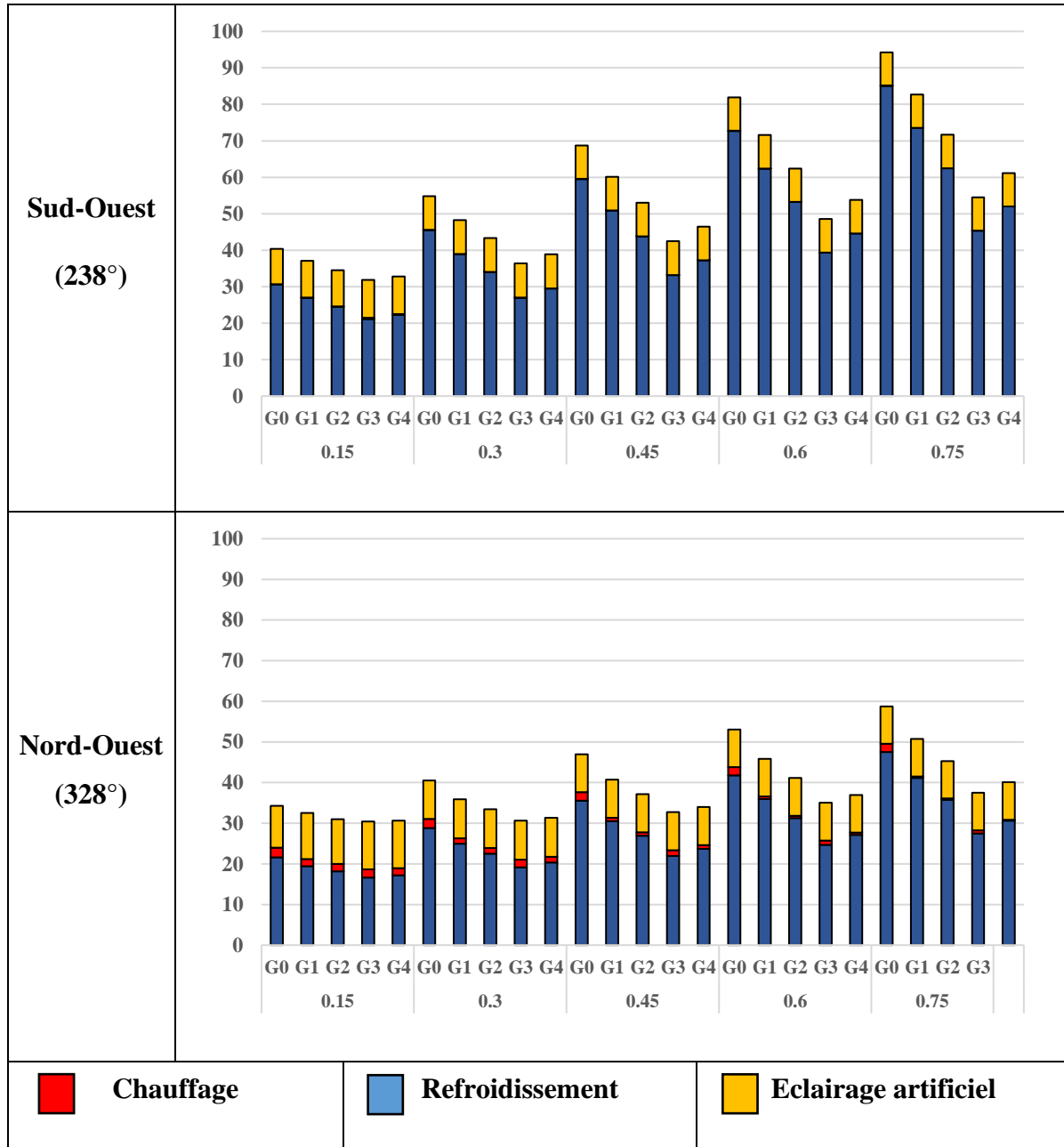
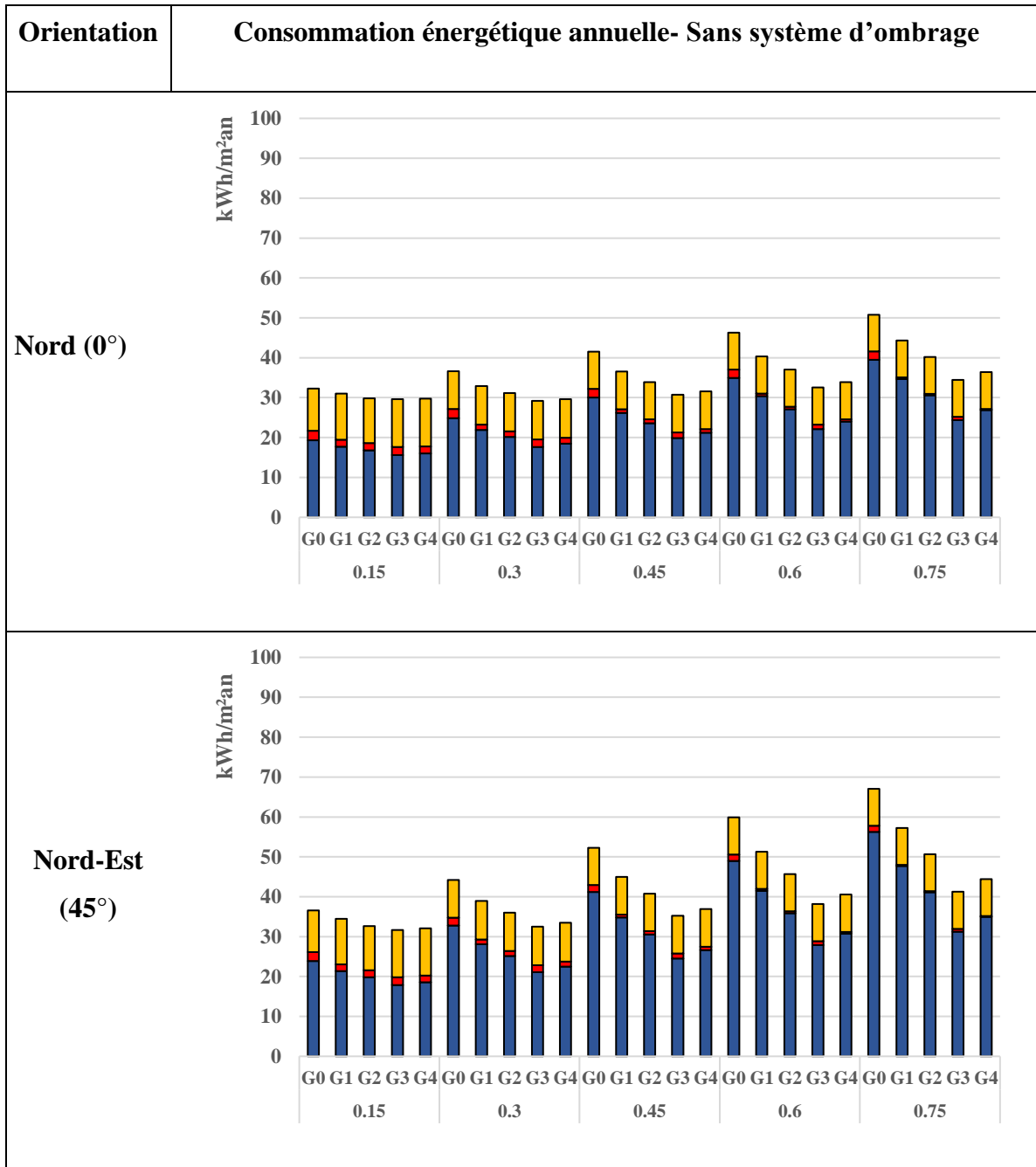
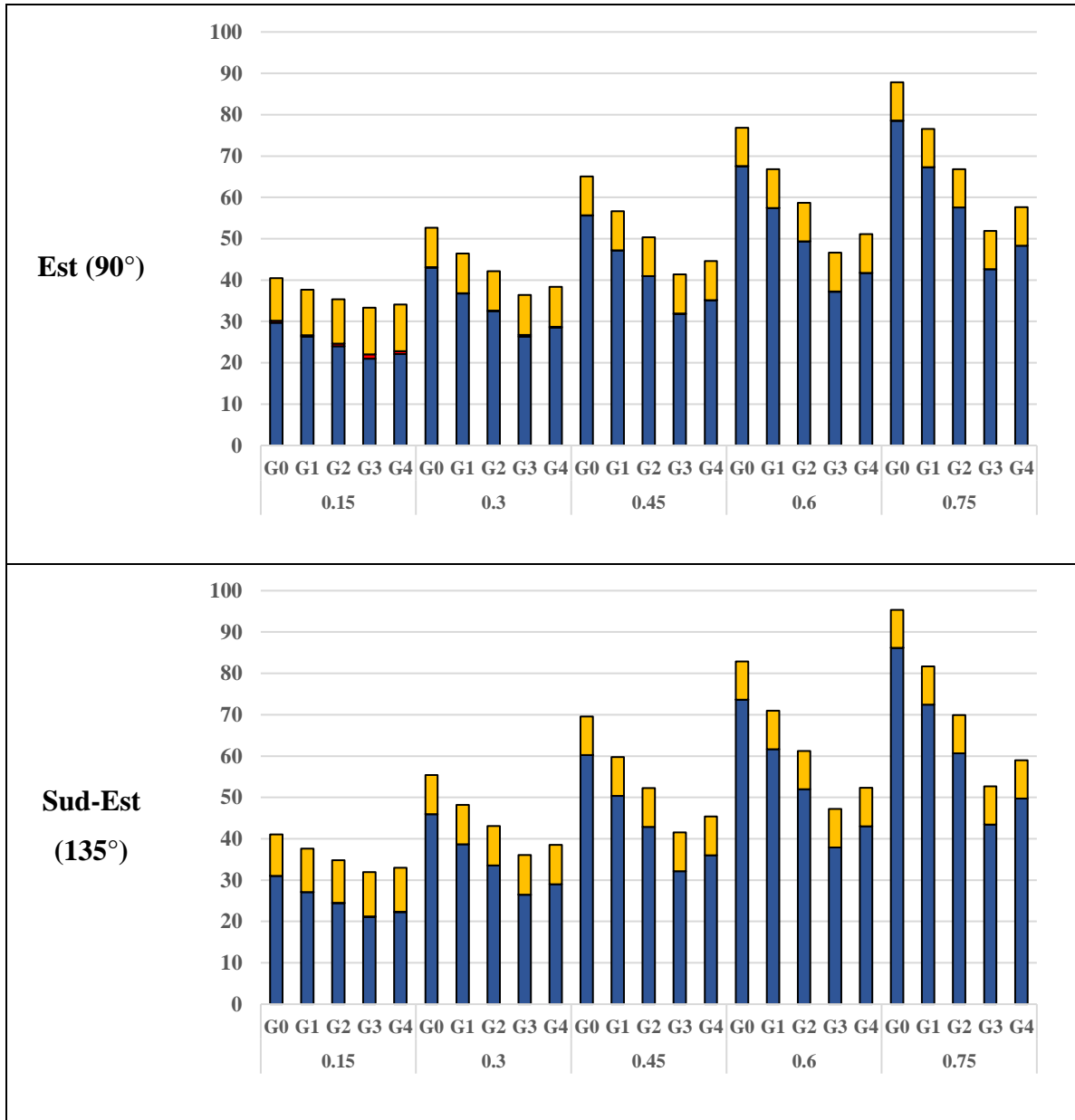
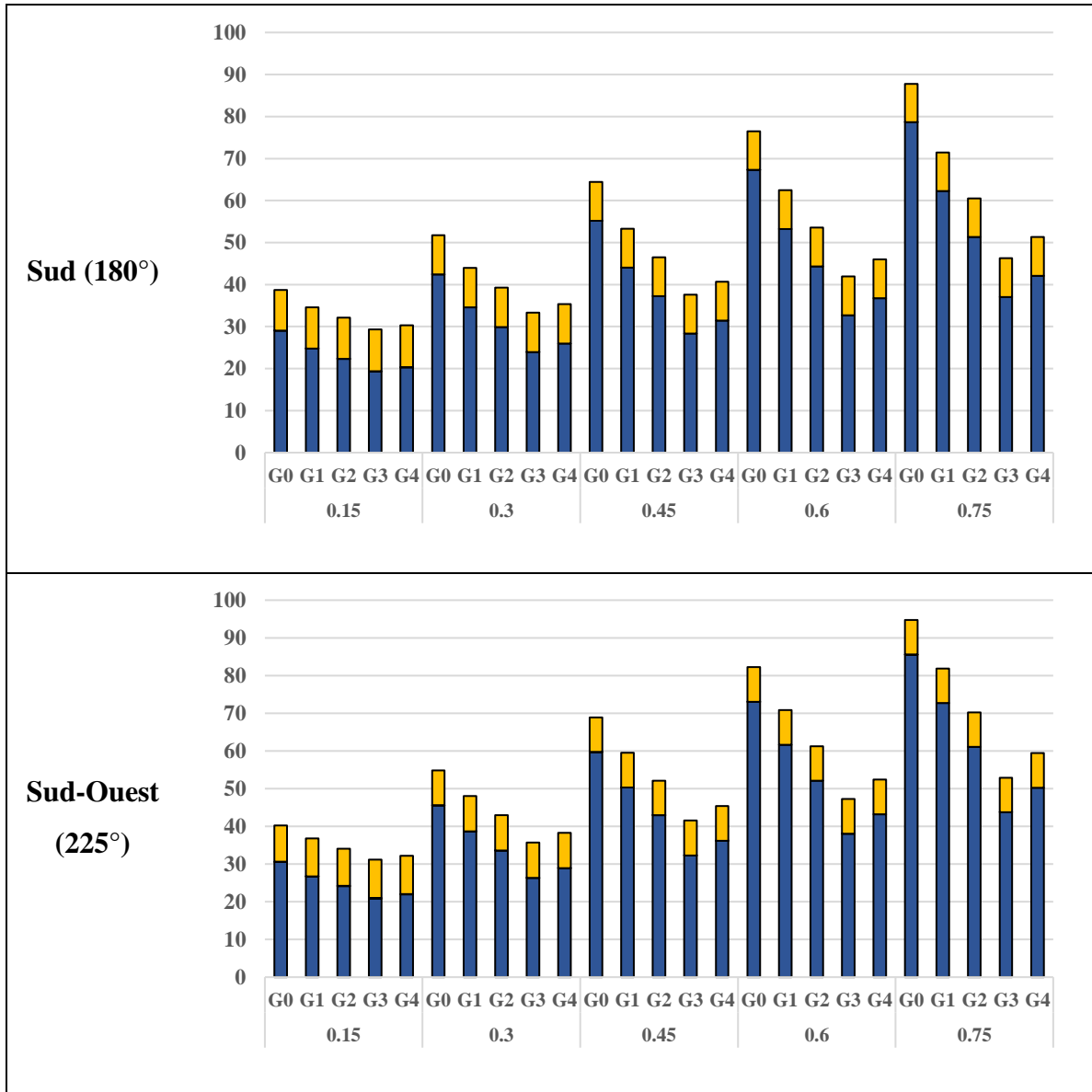


Figure V.16, Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations des façades du cas d'étude

V.4.2.2. Points cardinaux et semi-cardinaux







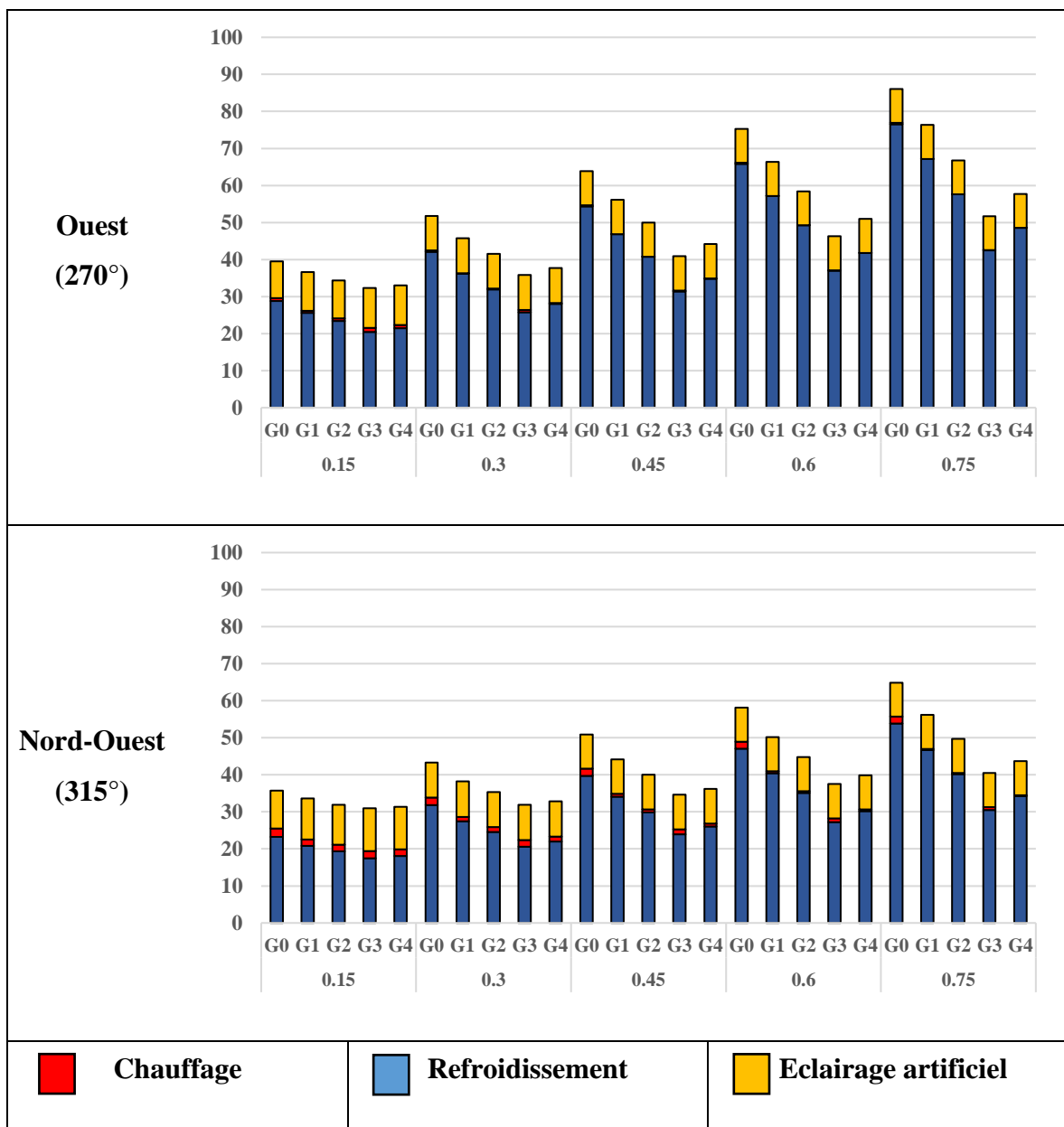


Figure V.17, Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations vers les points cardinaux et secondaires.

En analysant les résultats de la consommation d'énergie finale dans la Figure V.17, un rapport WWR plus élevé entraîne une augmentation des besoins de refroidissement et une diminution du chauffage et de l'éclairage artificiel, conformément aux résultats similaires obtenus pour les mêmes paramètres (Moretti et al, 2015 ; Marino et al, 2017 ; Aste et al, 2017). Pour les fenêtres non ombragées dans le climat chaud et sec de Biskra, un WWR spécifique ainsi qu'un type de fenêtre

doivent être justifiés pour chaque orientation en référence aux efficacités d'éclairage, d'équipement et de HVAC adoptées dans un immeuble de bureaux.

En détail, en fonction de l'augmentation incrémentale du rapport WWR et du type de fenêtre, nous distinguons une augmentation de la consommation d'énergie dédiée à ;

- **Refroidissement** : environ 25% à 49% pour une moyenne de 67%-85% de la consommation énergétique globale ;

Parallèlement à une diminution de :

- **Chauffage** : environ 5 % à 30 % pour une moyenne de 0,02 % à 3 % de la consommation énergétique globale ;
- **Éclairage artificiel** : environ 10 à 19 % pour une moyenne de 15 à 32 % de la consommation énergétique globale ;

En outre, chaque type de fenêtre affecte différemment le comportement énergétique du bâtiment et ses performances pour chaque balance WWR, de G0 comme pire scénario, G1, G2, G4 à G3 comme meilleur scénario. Bien que G4 ait le U_g le plus bas et un T_v similaire à G3 qui a le facteur LSG le plus élevé, elle est moins performante, en raison de son SHGC plus élevé. Par conséquent, nous pouvons conclure que le facteur LSG est le paramètre de fenêtre décisif à considérer pour les immeubles de bureaux dans un climat chaud et sec.

Plus en détail, pour le cas des autres orientations considérées pour le cas d'étude et les points cardinaux et semi-cardinaux (Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest), la solution optimale de WWR est égale à 15% équipée de la fenêtre G3 avec 31,68, 33,31, 31,95, 29.34, 31.19, 32.33 et 30.99 kWh/m²an. Par rapport à G0, les économies d'énergie réalisées grâce à cette configuration optimale sont égales à 13.2, 17.6, 22.2, 24.2, 22.5, 18.2 et 13.2% respectivement pour chaque orientation.

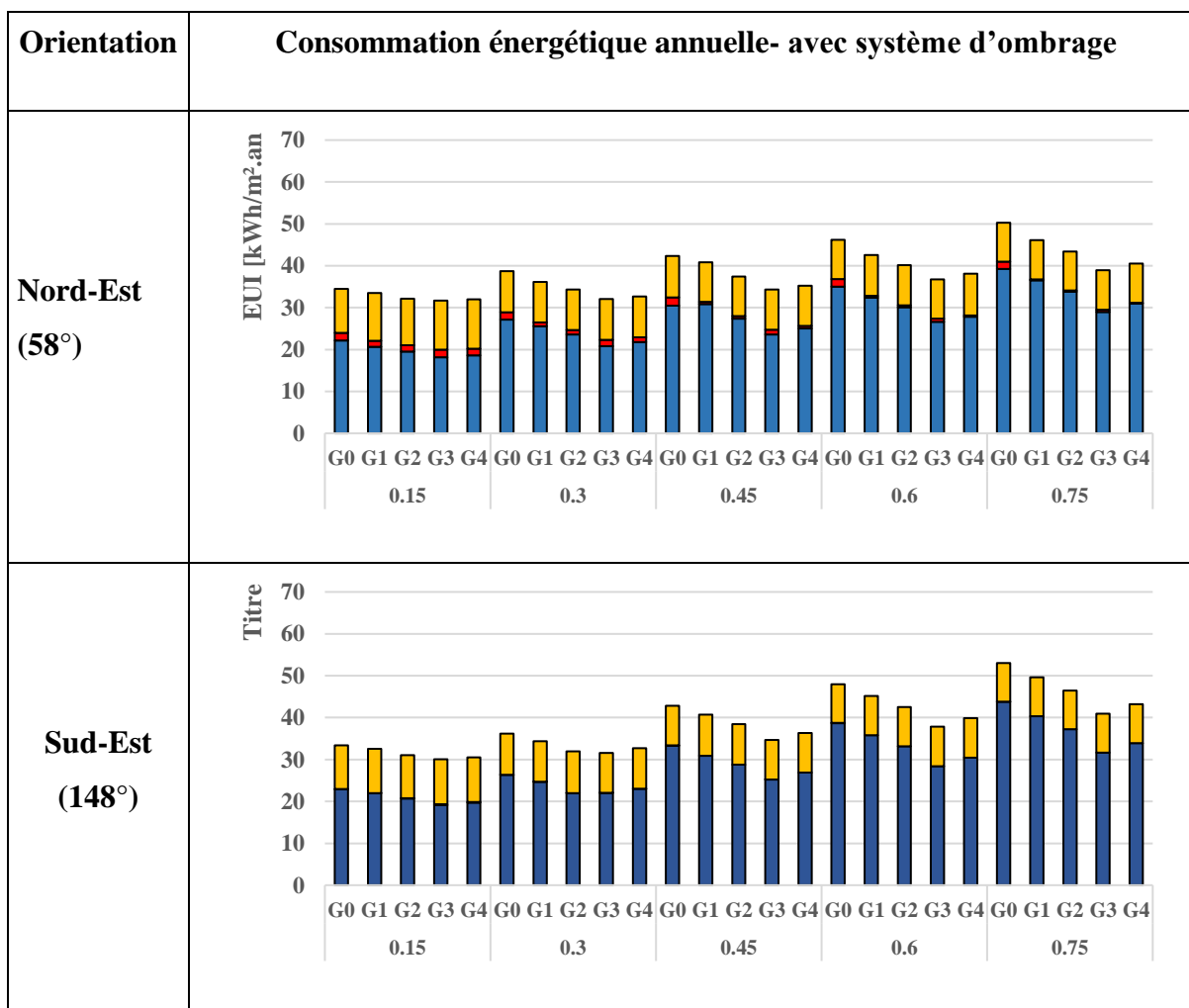
Pour la façade nord, la solution optimale de WWR est égale à 30% équipée de la fenêtre G3 avec 29.21 kWh/m²an avec des économies d'énergie de 20.2% par rapport à G0.

Au-delà de ces valeurs WWR, et en fonction du type de vitrage, des surfaces d'ouverture de fenêtre plus faibles ou plus élevées impliquent une augmentation importante de la consommation

énergétique globale, G3 étant le choix le plus efficace sur le plan énergétique, et G0 le pire scénario.

V.4.3. Impact des stores extérieurs mobiles :

V.4.3.1. Cas d'étude



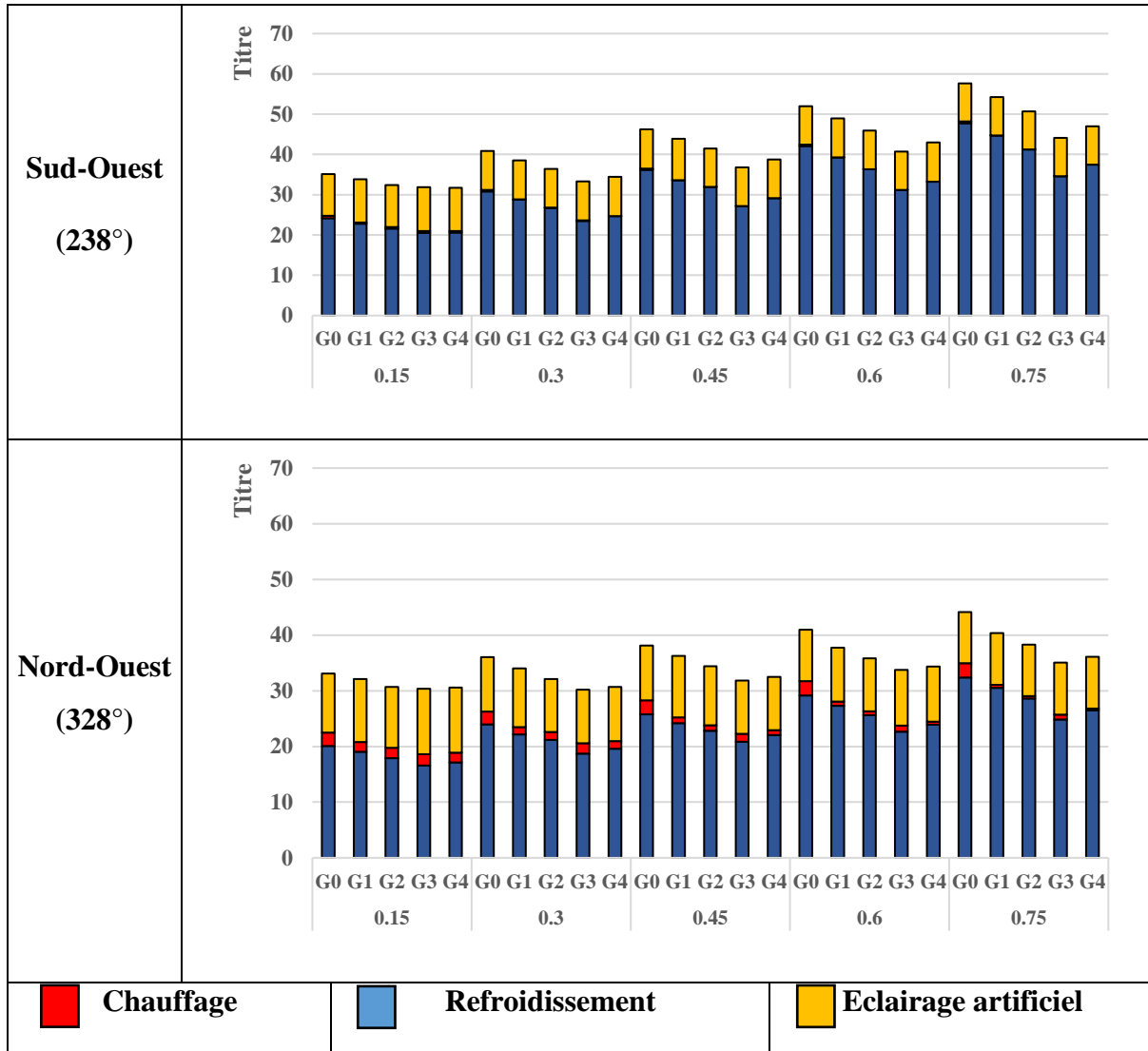
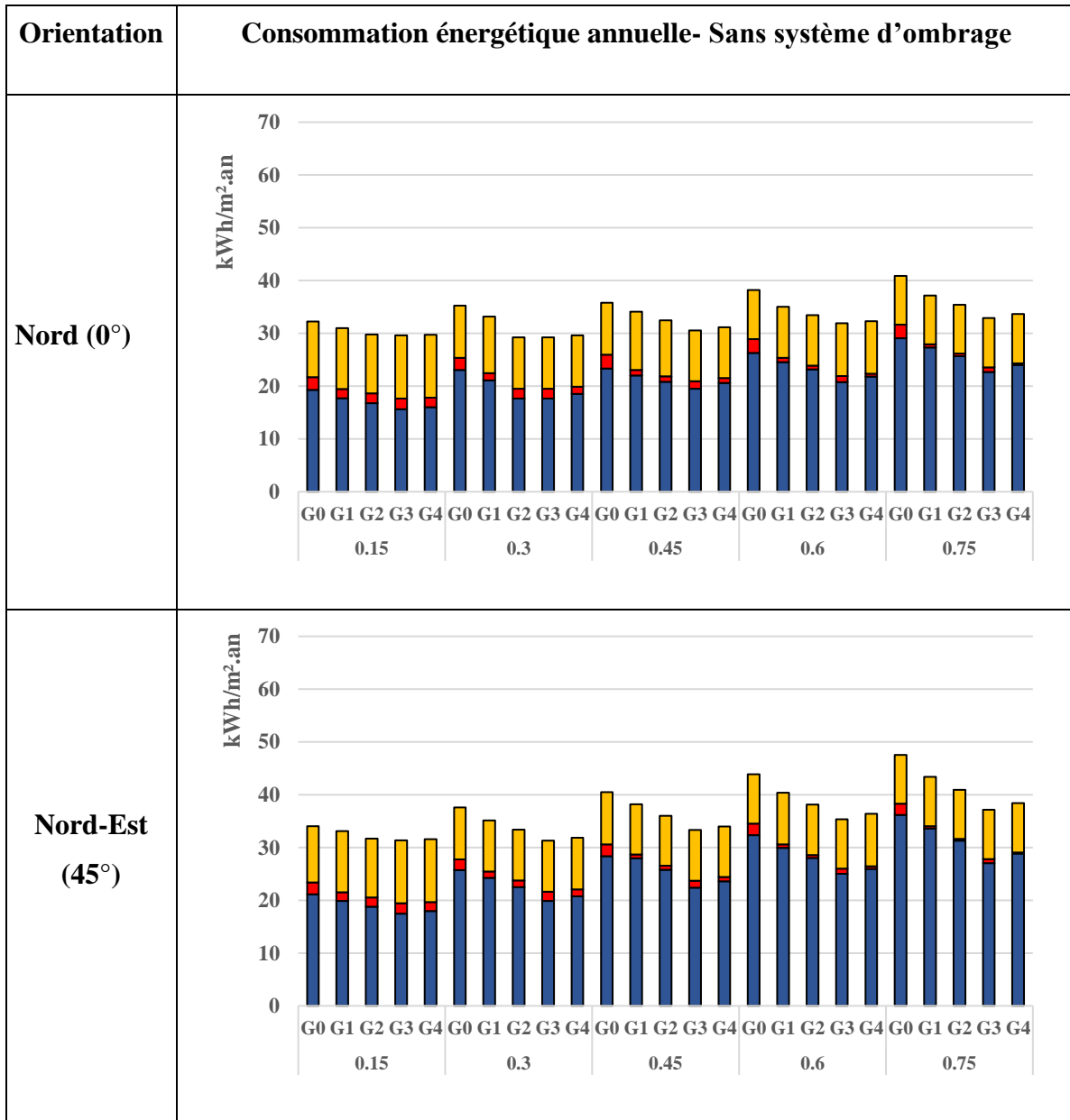
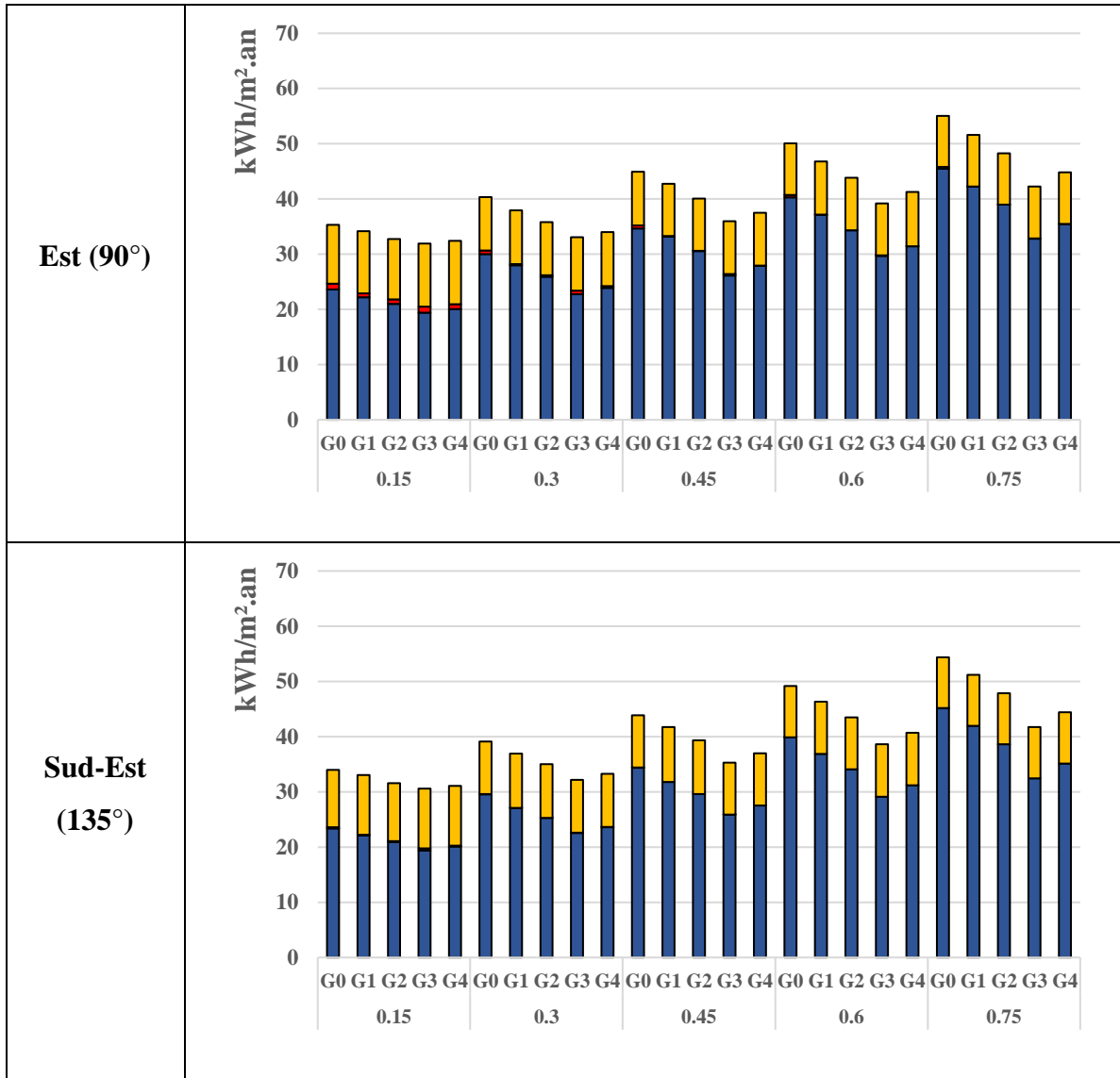
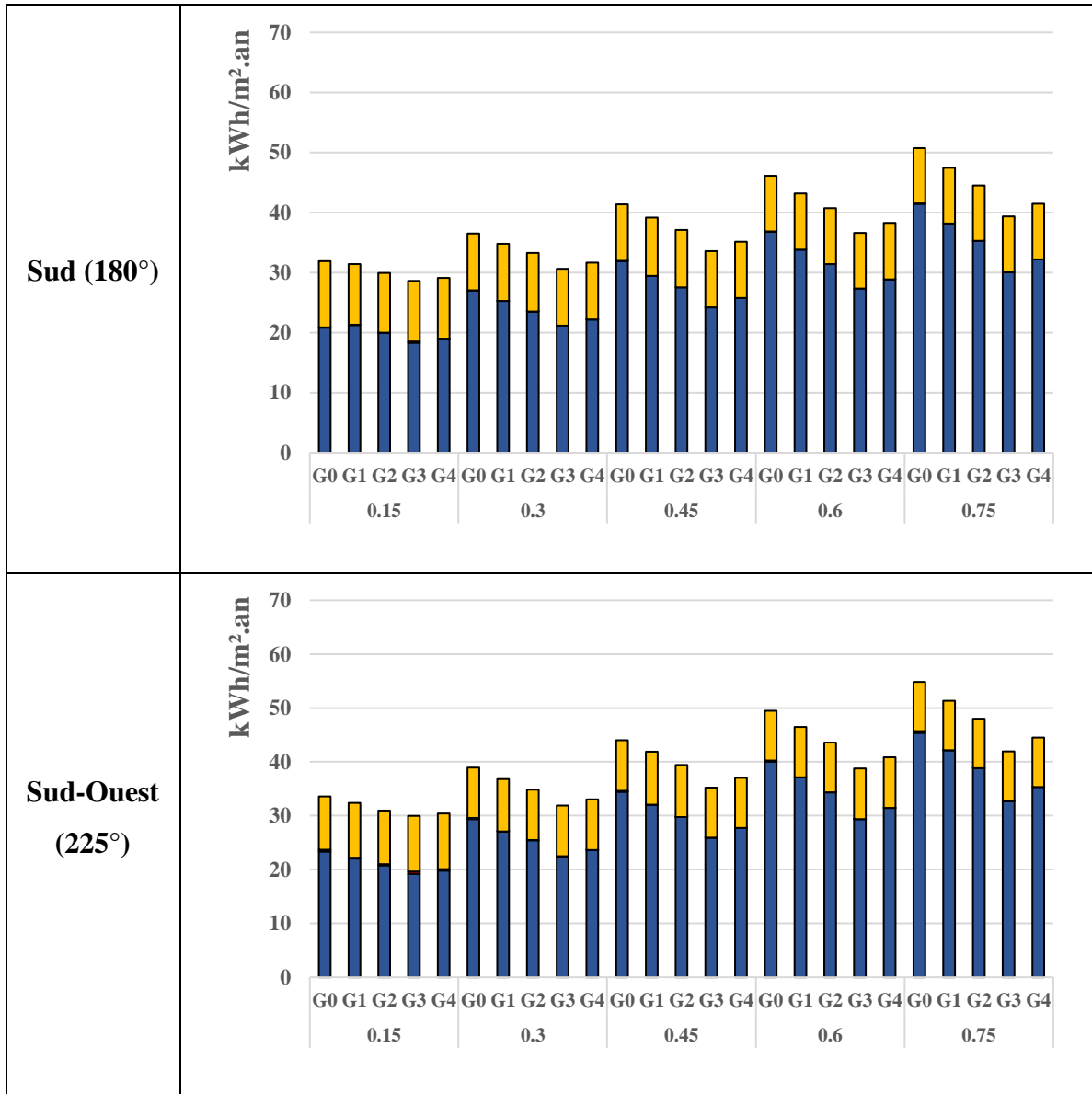


Figure V.18, Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en présence de système d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations de façades du cas d'étude

V.4.3.2. Points cardinaux et semi-cardinaux







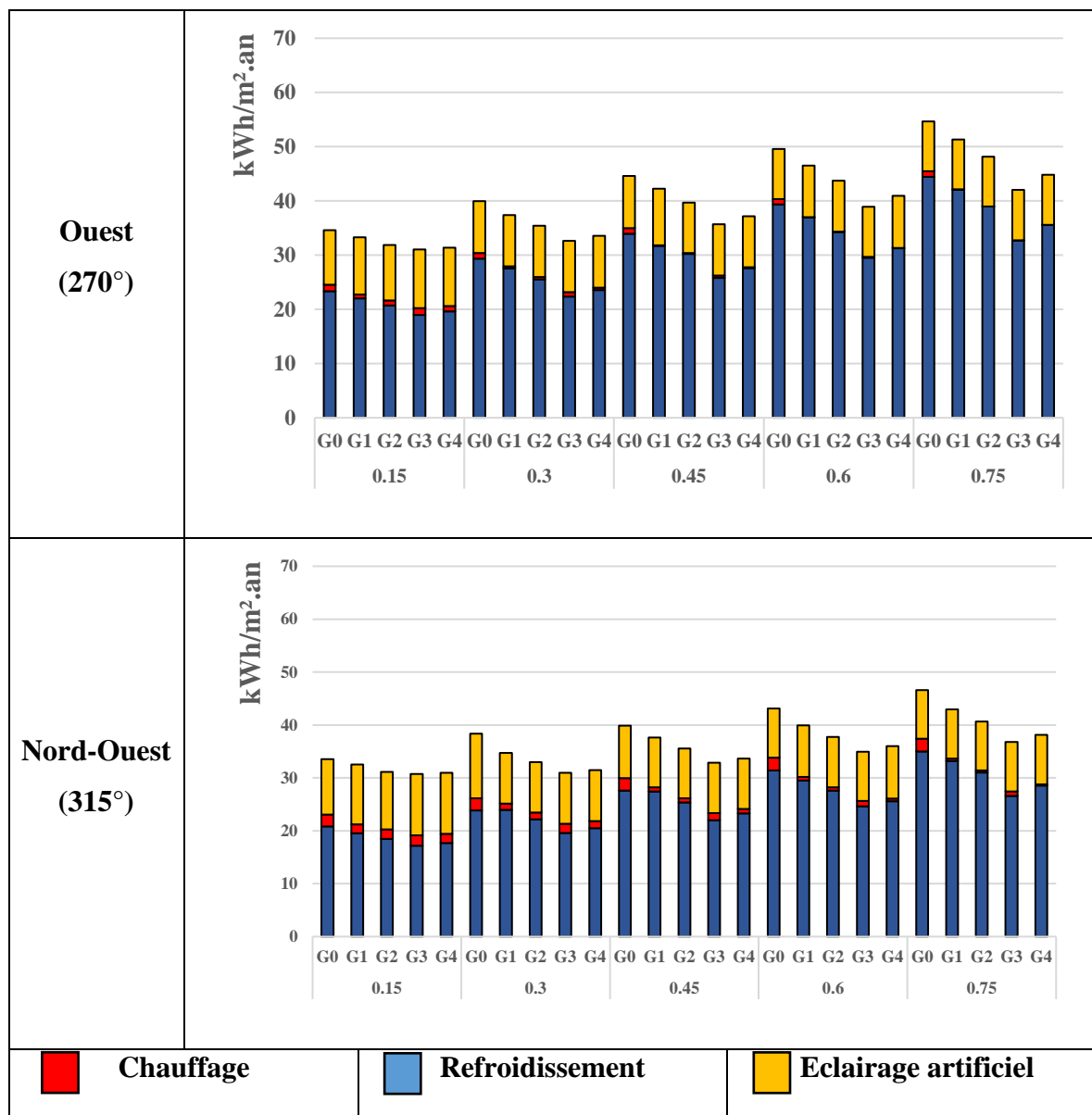


Figure V.19. Consommation énergétique en termes de refroidissement, chauffage et éclairage artificiel en présence de système d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations vers les points cardinaux et secondaires

Étant l'une des stratégies de réduction du refroidissement les plus attendues en période estivale et en raison de sa capacité réputée à éviter l'inconfort dû à l'effet d'éblouissement, les stores extérieurs mobiles ont été mis en œuvre comme stratégie d'ombrage dans l'optimisation énergétique des surfaces vitrées.

Pour les fenêtres ombragées dans le climat chaud et sec de Biskra, l'analyse des résultats de la consommation d'énergie globale dans la Figure V.19 a démontré que, bien qu'il y ait une réduction

significative de la consommation d'énergie globale, un comportement similaire avec les fenêtres non ombragées a été distingué, et un WWR spécifique avec un type de fenêtre doit être justifié pour chaque orientation. De plus, un WWR plus élevé entraîne une augmentation des besoins de refroidissement et une diminution du chauffage et de l'éclairage artificiel.

En détail, pour le cas des autres orientations considérées pour le cas d'étude et les points cardinaux et sous-cardinaux (Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest), la solution optimale de WWR est égale à 15% équipée de la fenêtre G3 avec 31.02, 30.59, 28.64, 29.34, 29.98, 31.04 et 30.73 kWh/m²an. Par rapport à G0, les économies d'énergie réalisées grâce à cette configuration optimale sont égales à 13.2, 17.6, 22.2, 24.2, 22.5, 18.2 et 13.2% respectivement pour chaque orientation.

Pour les façades Nord et Nord-Est, la solution optimale de WWR est égale à 30% équipée de la fenêtre G3 avec 29.21 kWh/m²an et 31.32 kWh/m²an avec des économies d'énergie de 17% et 16% par rapport à G0 respectivement pour les deux orientations.

V.4.4. Potentiel d'économie d'énergie de la solution du dispositif d'ombrage



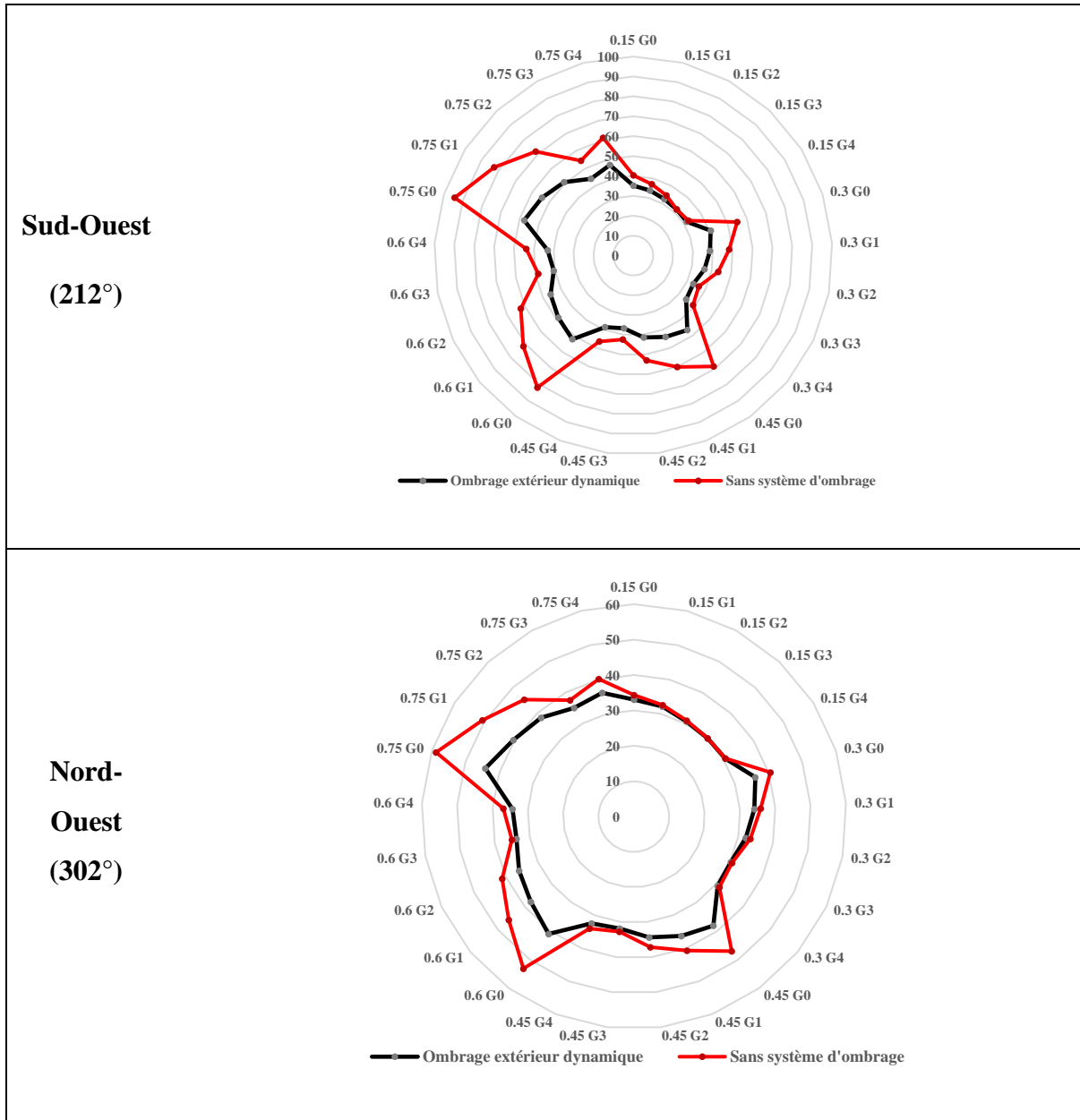
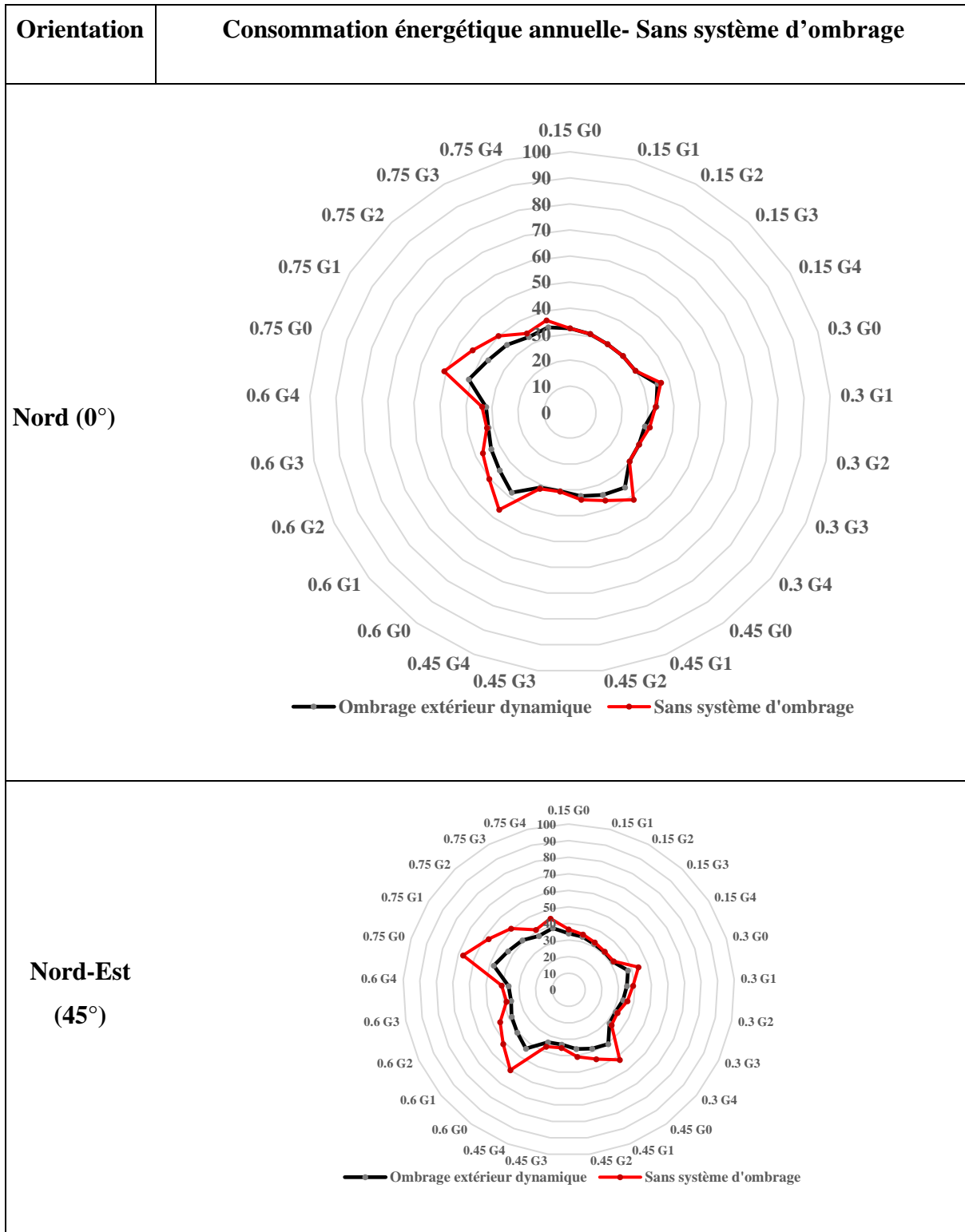
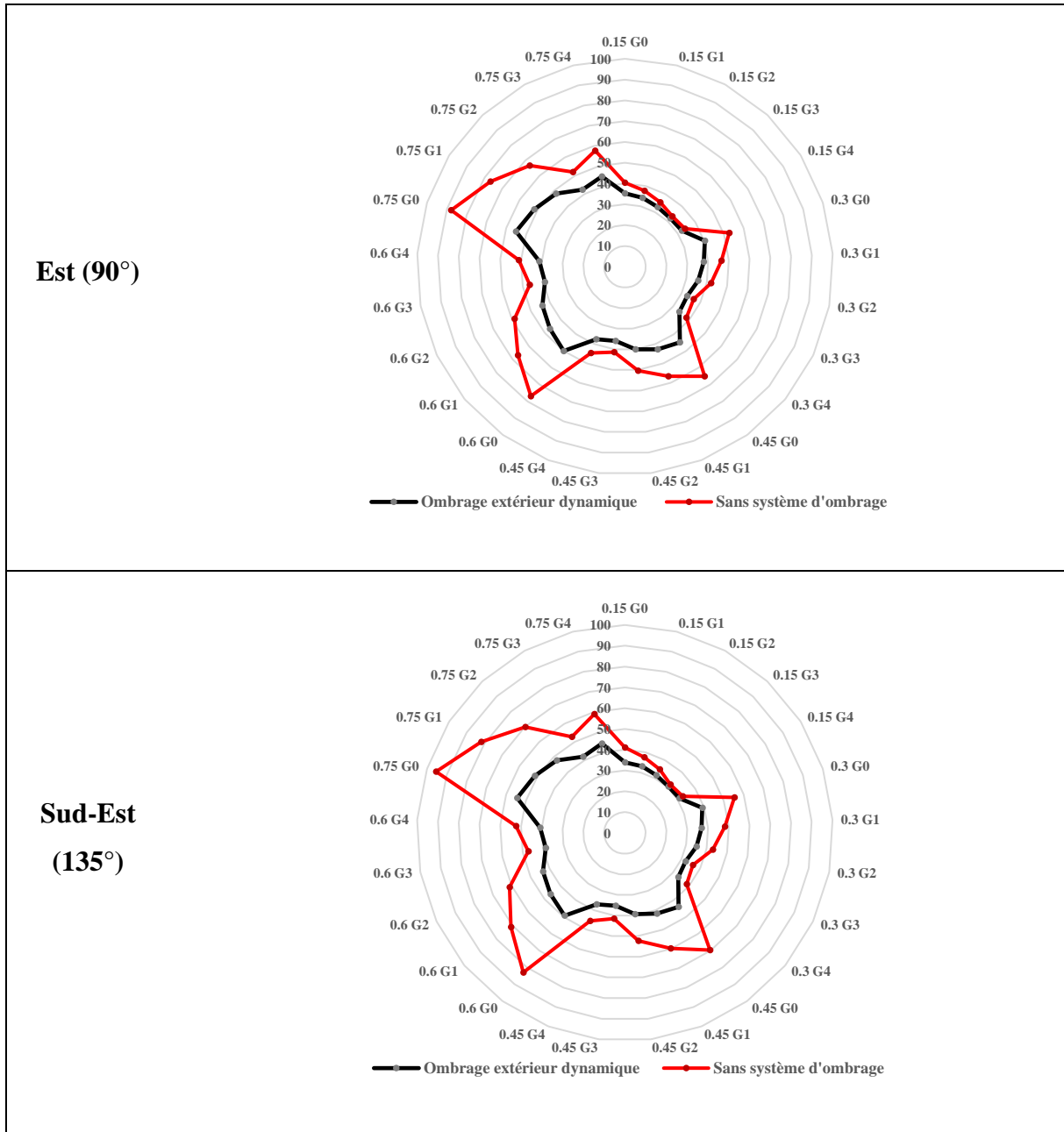
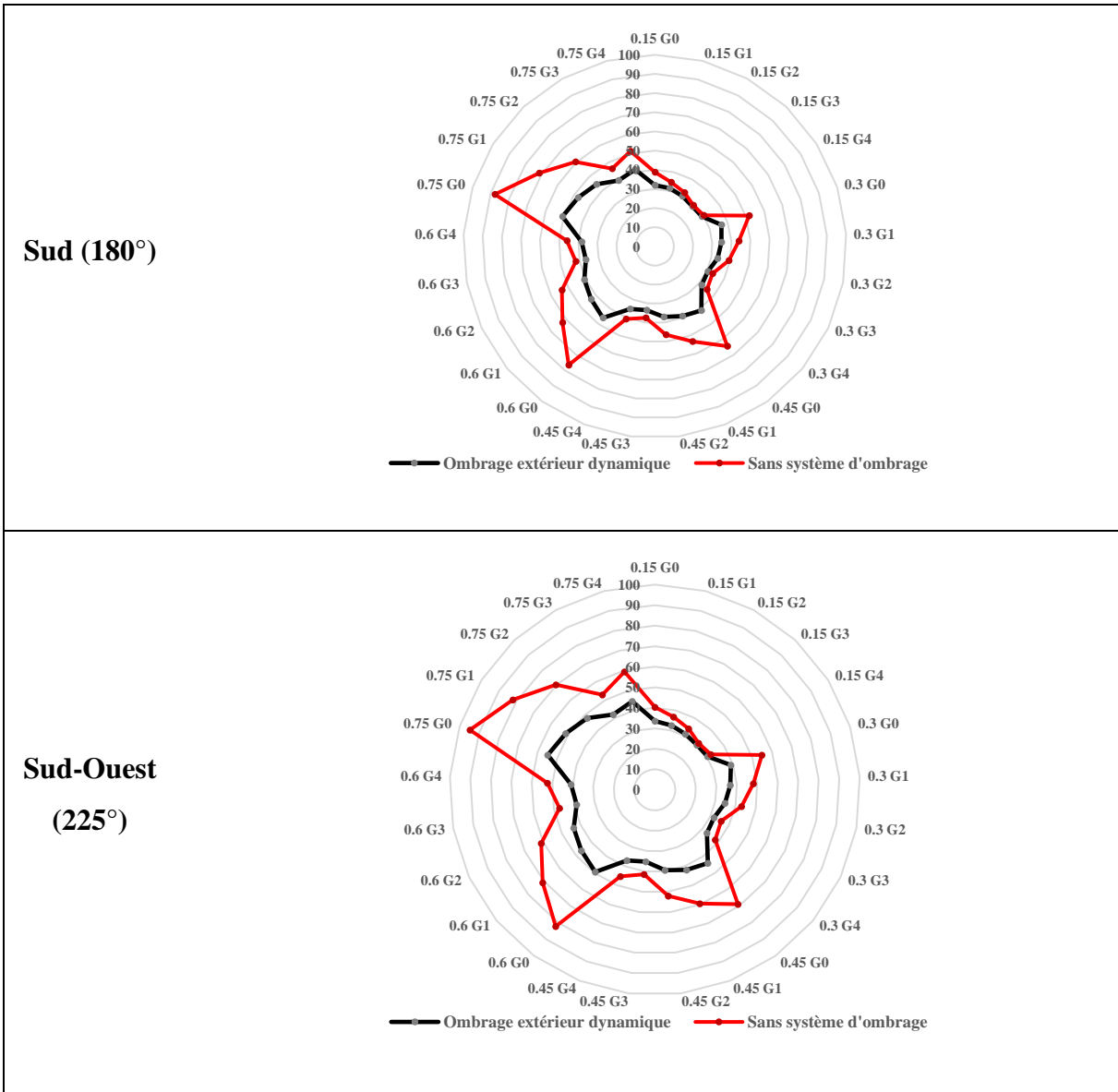


Figure V.20. Diagramme comparatif entre la consommation énergétique dans le cas de présence et d'absence des systèmes d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations de façades du cas d'étude

V.4.4.1. Points cardinaux et sub-cardinaux :







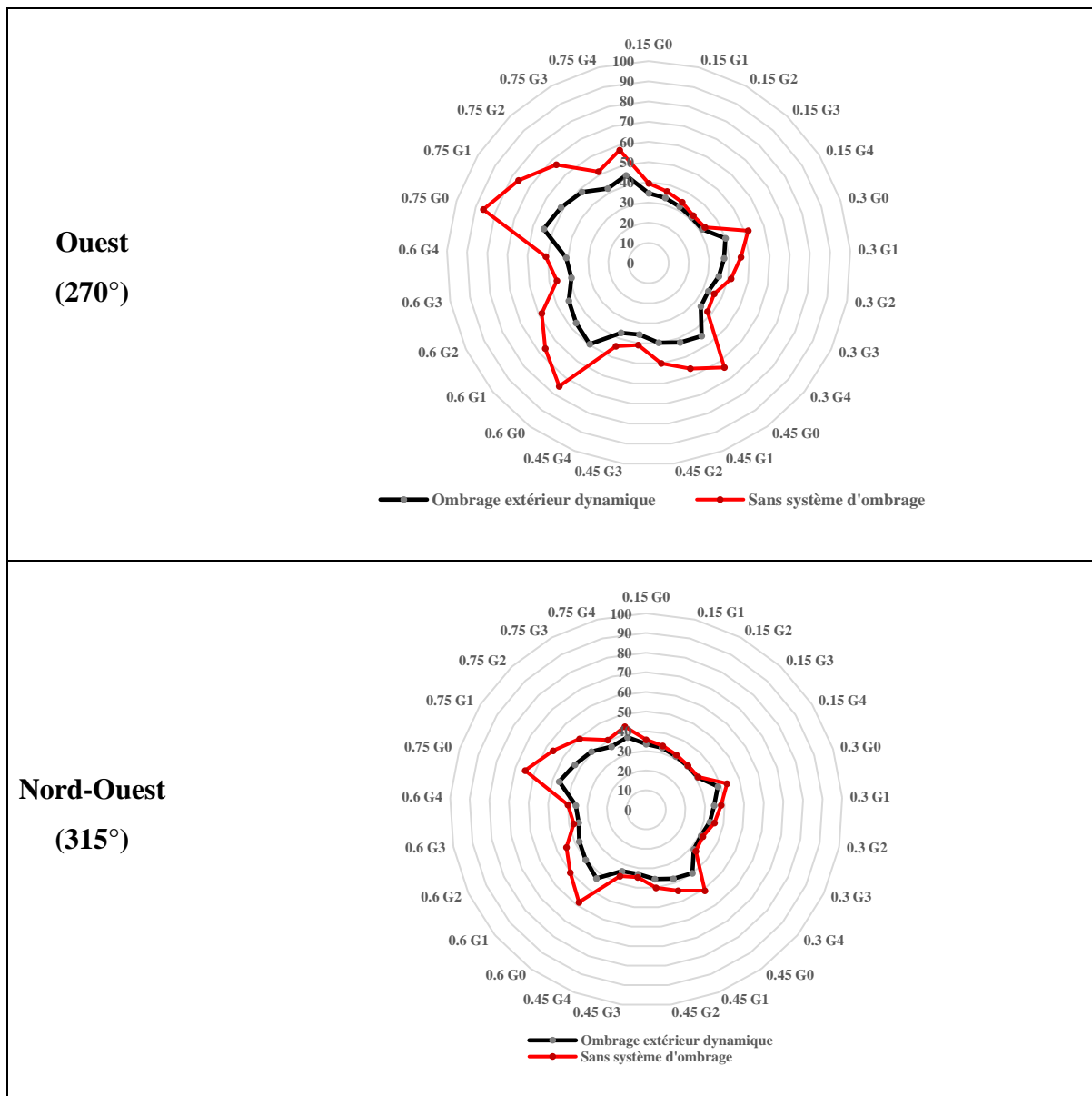


Figure V.21. Diagramme comparatif entre la consommation énergétique dans le cas de présence et d'absence des systèmes d'ombrage en fonction du WWR et du type de fenêtre – cas des orientations vers les points cardinaux

Les figures V.20 et V.21 présentent un rapport côte à côte, sous la forme d'un graphique en araignée, de la consommation énergétique globale en termes de chauffage, de refroidissement et de lumière artificielle pour les deux scénarios de protection solaire envisagés (avec et sans stores extérieurs). Ensuite, l'analyse comparative est présentée en mettant l'accent sur le potentiel d'économie d'énergie de la solution de protection solaire extérieure pour chaque orientation.

Il faut noter que, puisque les résultats de l'orientation du bâtiment cas d'étude présentaient des performances globales similaires à celles des orientations des façades sub-cardinales, celles-ci seront comprises dans le même processus de discussion.

a) Orientation: Nord (0°):

Pour une façade orientée Nord, l'utilisation d'une protection solaire externe n'est pas pertinente à un WWR de 15% à 30% pour tous les types de fenêtres considérés. A 45% également, pour les façades équipées de G3 et G4, aucune mesure d'ombrage n'est nécessaire, cependant, pour G0, G1 et G2, l'économie d'énergie résultant de cette considération varie de 4.31% pour G2 à 13,82% pour G0.

À partir de 60 %, l'utilisation de la protection solaire devient essentielle, car les économies d'énergie réalisées vont de 4,5 % pour G3 à 19,5 % pour G0 dans le pire des cas. Ce phénomène peut s'expliquer par le rôle de la protection solaire dans l'annulation de l'excès de rayonnement solaire diffus en maintenant le minimum nécessaire à la réduction des besoins élevés de refroidissement sans compromettre les exigences visuelles de la pièce et en affectant la consommation d'énergie de l'éclairage artificiel.

b) Orientations : Nord-Est (45°) et Nord-Ouest (315°) :

Pour un WWR de 15% pour les façades nord-est et nord-ouest, les systèmes d'ombrage ne sont nécessaires que pour G0 et G1 avec des économies de 6,9%, 6,09% et 3,9%, 3,31% pour chaque orientation et type de fenêtre respectivement, et une considération minimale pour les autres systèmes de vitrage avec des économies allant de 1,1%, 0,82% à 2,86%, 2,41%. Pour un WWR de 30% et plus jusqu'à 75%, les économies d'énergie deviennent plus significatives, allant de 4,99%-13,53% pour G3 et 15%-29,1% respectivement.

c) Orientations : Est (90°), Sud-Est, Sud (180°), Sud-Ouest (215°) et Ouest (270°) :

Le système d'ombrage pour ces orientations présente des potentiels d'économie élevés, et son intensité devient plus significative avec un WWR plus élevé et des types de fenêtres moins performants. Les valeurs vont de 2.99% pour G3 dans le meilleur des cas et de 17.47% pour G0

dans le pire des cas pour un WWR de 15% (orientation sud), à 20.8% et 42.95% respectivement pour un WWR de 75% (sud-est).

Le tableau V.6 ci-dessous présente le potentiel d'économie d'énergie du système de protection solaire extérieure mobile pour chaque variation du WWR et du type de fenêtre pour chaque orientation.

Tableau V.6: Potentiel d'économie d'énergie du système de protection solaire extérieure.

WWR [-]	Type de la fenêtre	Economie en énergie [%]							
		Nord (0°)	Nord- Est (45°)	Est (90°)	Sud- Est (135°)	Sud (180°)	Sud- Ouest (225°)	Ouest (270°)	Nord- Ouest (315°)
0.15	G0	0.0	6.9	12.8	17.3	17.5	16.7	12.4	6.1
	G1	0.0	3.9	9.3	12.2	9.2	11.9	9.1	3.3
	G2	0.0	2.9	7.3	9.3	6.7	9.1	7.2	2.4
	G3	0.0	1.1	4.2	4.3	2.4	3.9	4.0	0.8
	G4	0.0	1.5	5.0	5.8	3.8	5.6	5.1	1.2
0.3	G0	3.7	15.1	23.4	29.3	29.4	29.0	22.9	11.4
	G1	0.7	9.7	18.4	23.4	20.8	23.4	18.2	9.1
	G2	6.2	7.3	15.1	18.7	15.2	18.9	14.8	6.7
	G3	0.0	3.7	9.2	10.8	8.1	10.8	8.9	3.1
	G4	0.0	4.9	11.4	13.7	10.6	13.7	11.1	4.3
0.45	G0	13.8	22.6	30.9	36.9	35.8	36.1	30.1	21.7
	G1	6.6	15.0	24.5	30.1	26.5	29.6	24.8	14.8
	G2	4.3	11.7	20.4	24.7	20.1	24.4	20.6	11.2
	G3	0.6	5.5	13.0	15.1	10.7	15.2	12.7	5.0
	G4	1.4	7.8	15.9	18.6	13.7	18.4	15.9	7.1
0.6	G0	17.5	26.7	34.9	40.7	39.7	39.8	34.2	25.8
	G1	13.1	21.3	29.9	34.7	30.8	34.4	29.9	20.5
	G2	9.7	16.5	25.3	29.0	23.9	28.8	25.2	15.8
	G3	2.0	7.4	15.9	18.2	12.8	17.9	15.9	6.8
	G4	4.7	10.3	19.3	22.2	16.8	22.1	19.7	9.8
0.75	G0	19.5	29.1	37.3	43.0	42.2	42.1	36.5	28.2
	G1	16.1	24.3	32.6	37.3	33.6	37.3	32.7	23.6
	G2	11.9	19.2	27.8	31.5	26.5	31.6	27.9	18.2
	G3	4.5	9.9	18.6	20.8	15.0	20.7	18.7	9.2
	G4	7.6	13.5	22.2	24.7	19.2	25.1	22.3	12.8

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'impact des propriétés des surfaces vitrées vis-à-vis de l'efficacité énergétique a été évalué après avoir élaboré un modèle de " cellule test ". Les paramètres étudiés se rapportaient aux propriétés thermiques et optiques des fenêtres (U_g , SHGC et V_t), et au ratio d'ouverture (WWR), tout en supposant deux cas de figures : l'absence d'ombrage ou à l'opposé la présence des stores extérieurs mobiles. Tenant compte des orientations selon les points cardinaux et semi-cardinaux spécifiques au cas d'étude, diverses possibilités d'orientation ont été envisagées.

L'évaluation énergétique a porté sur la consommation globale de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel par rapport aux paramètres de confort visuel du lieu de travail (exigences en matière d'éclairage), et a été réalisée avec les plugins environnementaux "Ladybug & Honeybee " fournis par EnergyPlus. Afin de garantir un niveau d'éclairage approprié et d'éviter l'éblouissement, un algorithme de contrôle a été défini permettant une gradation de l'éclairage artificiel et des stores extérieurs dynamiques dans le processus de simulation.

A partir de l'analyse des résultats obtenus et selon les conditions de simulation effectués, certaines observations ont été dégagées, elles se déclinent comme suit :

- En général, des valeurs U_g plus faibles réduisent la consommation d'énergie dédiée au chauffage et au refroidissement, un faible SHGC réduit le refroidissement et augmente le chauffage, un faible V_t augmente la consommation d'énergie dédiée au chauffage et au refroidissement.
- Le rapport WWR est le paramètre qui affecte le plus les économies d'énergie, et le rapport global optimal se situe entre 15% et 30% ; le rapport WWR30% étant favorable pour les façades orientées au nord et au nord-est, et 15% pour le reste des façades.
- Du point de vue de l'économie d'énergie, la prise en compte des stores extérieurs mobiles présente des économies d'énergie significatives, même pour le WWR optimal, environ 3 % pour les fenêtres à double vitrage à haute performance avec un LSG relativement élevé (G3), et 12 à 17 % pour une fenêtre à simple vitrage à couche claire (G0).
- D'un point de vue énergétique, et indépendamment du WWR, la fenêtre à double vitrage à haute performance avec contrôle solaire (G3) est la plus efficace sur le plan énergétique et

le LSG est le facteur qui a le plus d'impact sur la consommation énergétique globale, et un U_g approprié accompagné d'un LSG est nécessaire dans un tel climat caractérisé par des radiations solaires intenses tout au long de l'année.

- Les façades nord n'ont besoin d'être protégées qu'à partir d'un taux d'humidité relative supérieur à 45-60%, selon le type de fenêtre, soit quand la protection contre les gains de chaleur solaires diffus devient plus importante.

Par conséquent, les résultats obtenus confirment l'hypothèse concernant le caractère interdépendant des attributs physiques de la fenêtre sur la consommation d'énergie du bâtiment et suppose un potentiel d'économie d'énergie assez élevé.

Chapitre VI

Impact des paramètres des surfaces opaques sur
l'efficacité énergétique du bâtiment

CHAPITRE VI. Impact des paramètres des surfaces opaques sur l'efficacité énergétique du bâtiment

VI.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la deuxième étape de l'étude paramétrique et aborde l'évaluation et l'optimisation des performances énergétiques des parois opaques tout en proposant des alternatives d'auto-ombrage. C'est donc autant les paramètres matériel-constructifs que l'aspect formel de la façade qui sont maintenant ciblés, puisque les zones ombragées (simulées et calculées) permettent de quantifier les éventuels décrochements, éléments saillants horizontaux, etc. qui à leur tour sont déterminant pour la configuration de la façade et son apparence. Ainsi, la première partie du chapitre présente l'approche adoptée pour l'analyse du comportement thermique de la façade en termes de chauffage et refroidissement sous l'effet de la variation simultanée de la masse thermique du mur défini par sa stratification. Cette méthode puisée dans la littérature, consiste à étudier l'effet de l'isolation (épaisseur, matériaux, stratification, etc.) sur la consommation énergétique opérationnelle, puis considère l'impact de l'énergie intrinsèque induite par la quantité d'isolation nécessaire sur la consommation d'énergie primaire.

La deuxième partie du chapitre est basée sur une méthode mimant l'effet de self-shading. Elle évalue l'effet des zones ombragées appliquées sur les parois opaques de ce

bâtiment. Les résultats escomptés, en plus d'évaluer le comportement thermique des parois opaques en termes de transmission thermique et d'inertie thermique, permettront de définir le type de mur, l'épaisseur de l'isolant et les seuils d'ombrage optimaux pour le cas de bâtiments de bureaux dans le climat chaud et aride.

Partie 1 : Impact des paramètres thermo-physiques et dynamiques du mur extérieur, et du coefficient d'absorption solaire

VI.2. Elaboration du protocole expérimental

L'agence algérienne "Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE)" a ciblé le secteur du bâtiment dans le cadre de la mise à jour 2015 du Plan d'Efficacité Énergétique à l'horizon 2030, lequel préconise le recours aux équipements et technologies performants. Ainsi, ce programme proclame l'utilisation obligatoire de l'isolation thermique pour les nouvelles constructions et dans le cadre des mesures de rénovation, en particulier pour les bâtiments résidentiels. Pour ce faire, il se base sur les textes prescriptifs et des documents techniques réglementaires notamment les DTR. C3-2, et DTR. C3-4. Cependant, les directives spécifiques au climat en ce qui concerne la transmission thermique des composants de l'enveloppe du bâtiment sont vagues et imprécis, en particulier pour le secteur tertiaire.

Les mesures réglementaires touchent principalement l'enveloppe du bâtiment, car la consommation d'énergie des bâtiments est en corrélation étroites avec les caractéristiques physiques et matérielles des parois et surfaces définissant la clôture du bâtiment (Zhou et al., 2012 ; Mansouri *et al.*, 2018). En outre, selon les parties exposées du bâtiment, les surfaces des murs de façade peuvent être sensiblement plus élevées que la surfaces de la toiture, et de fait, l'optimisation des paramètres des surfaces opaques peut jouer un rôle central dans la réduction de la consommation d'énergie finale du bâtiment (Wilkinson et al., 2017).

Toutefois, si l'ajout d'une isolation thermique aux murs extérieurs peut réduire les besoins en chauffage jusqu'à 70 % (Tukhtamisheva et al., 2020), dans certains contextes, cela peut aussi entraîner une surchauffe en période de refroidissement. Il est donc nécessaire de définir le seuil d'épaisseur pour assurer un équilibre entre les différents besoins (Kaynakli et al., 2011). Par ailleurs, l'efficacité de la couche d'isolation est également liée à l'inertie thermique, car elle correspond à la réponse dynamique du mur ou de l'enveloppe à une contrainte

climatique qu'elle va déphaser et amortir (Claude et al., 2020). Elle affecte la manière dont un bâtiment réagit aux changements des conditions externes et internes, influençant ses modèles de charge thermique réels (charge sensible pour le chauffage et le refroidissement) (Khadraoui et al., 2019). En outre, l'absorption solaire de la couche de revêtement externe affecte sensiblement le comportement thermique du mur en augmentant les gains de chaleur provenant des radiations solaires (Yao et al., 2011).

Par conséquent, un processus complet permettant de déterminer la meilleure épaisseur d'isolation thermique des murs, l'inertie thermique et l'absorption solaire nécessite non seulement de prendre en compte l'énergie opérationnelle, mais aussi d'examiner en profondeur l'énergie intrinsèque, qui peut même être un facteur important dans le bilan énergétique global du cycle de vie (Ounis et al., 2022).

L'évaluation de l'épaisseur optimale d'isolation est généralement définie en fonction de l'économie d'énergie en phase opérationnelle (Kumar et al., 2020) ou en adoptant l'approche du coût global introduit par la directive européenne 2010/31/UE (Ounis et al.). Par ailleurs, seuls quelques travaux de recherche ont étudié l'effet de l'inertie thermique sur la performance énergétique du bâtiment en prenant en compte une transmission thermique similaire pour une comparaison objective entre les différentes variantes (Aste et al, 2015, Ounis et al, 2022) et encore moins pour le comportement intermittent d'un immeuble de bureaux sous climat chaud et sec.

Dans cette première partie chapitre, une analyse énergétique des paramètres du mur extérieur du bâtiment de bureaux "Algérienne Des Eaux" pris comme cas d'étude, sera effectuée. L'évaluation prendra en considération l'interconnexion entre l'inertie thermique, le niveau d'isolation et le coefficient d'absorption solaire lié à la couleur du revêtement de la couche externe simultanément, en ce qui concerne l'énergie opérationnelle et l'énergie intrinsèque encourue par sa solution d'isolation. L'objectif est de permettre une évaluation détaillée de la performance énergétique des bâtiments avec des paramètres utilisateurs et limites prédéfinis qui renforceront les études portant sur le secteur tertiaire dans le contexte algérien. Enfin, nous définissons la solution optimale pour les murs extérieurs des immeubles de bureaux dans le cas du climat chaud et sec de Biskra, ce qui permettra de remédier à l'insuffisance des épaisseurs d'isolation recommandées et donc de la valeur U des murs extérieurs.

Le processus de la simulation paramétrique est basé sur une méthode récente développée et validée par Ounis et al, (2022), qui consiste en une "méthode d'évaluation appropriée de la

valeur U de l'enveloppe du bâtiment" en vue d'atteindre "l'équilibre optimal entre le chauffage, le refroidissement et l'impact environnemental". Cette méthode servira à examiner l'influence des paramètres des murs extérieurs, à savoir la variation de l'inertie thermique du mur, l'épaisseur de l'isolation et le coefficient d'absorption solaire, sur la performance énergétique saisonnière des bâtiments de bureaux, dans le but d'obtenir la meilleure solution en termes d'économies d'énergie opérationnelle et intrinsèque pour un cycle de vie donné de 30 ans.

À cet égard, le processus d'analyse est structuré en trois étapes successives :

En premier lieu, sur la base du modèle de référence, nous avons abordé les gains de chaleur de la paroi extérieure pour qu'ils soient limités aux surfaces opaques, ce qui a permis de considérer précisément l'influence de l'épaisseur de l'isolation sur la performance thermique de la paroi, pour aboutir à un " modèle de conception ". En détail, nous avons concentré les investigations uniquement sur 2 étages intermédiaires, puis, sur la base des résultats du chapitre V, nous avons défini des paramètres prédéfinis pour les seuils de déclenchement des protections solaires des vitrages présentant les meilleurs résultats en termes d'économies d'énergie.

Ensuite, nous définissons les variables de simulation :

- Trois configurations de murs à transmission thermique égale, représentant des murs légers, mi-lourds et lourds définis par leur comportement thermique dynamique.
- Une solution d'isolation adéquate avec une plage prédéfinie et un pas de progression.
- Une gamme représentative pour le coefficient d'absorption solaire qui généralise la variation de la couleur du mur extérieur.

Enfin, les besoins en énergie thermique du bâtiment pour le chauffage et le refroidissement ont été évalués en fonction d'une série d'épaisseurs d'isolation et de coefficients d'absorption solaire prédéfinis par une approche itérative de force brute pour les 3 systèmes de murs, sous des catégories et sous-catégories prédéfinies d'*inputs* d'utilisation du bâtiment. Les simulations ont été réalisées sous l'interface paramétrique Rhinoceros/Grasshopper via le plugin environnemental "Ladybug & Honeybee tools" (Roudsary et al., 2013) avec le support du logiciel EnergyPlus (Sousa, 2012) basé sur un fichier de données météorologiques TMY.

La consommation annuelle d'électricité du système HVAC avec COP/EER variable (en référence à la phase de calibration et de validation) a été calculée pour les 2 étages sélectionnés pendant la durée de vie supposée de 30 ans, plus l'énergie intrinsèque des matériaux nécessaires pour isoler les murs de cette partie du bâtiment. Ensuite, l'énergie primaire a été déterminée en considérant le facteur de conversion moyen électricité/énergie primaire égal à 2,5 kWh_{elec}/kWh_{th} (Eurelectric, 2018). Par conséquent, sur la base de ces hypothèses, la

consommation d'énergie finale relative à la phase opérationnelle est calculée à l'aide de l'équation (1) :

Primary energy consumption

$$= \left(\frac{\text{Heating energy demand}}{COP} + \frac{\text{Cooling energy demand}}{EER} \right) \times \text{Overall efficiency (Distribution, emission and control)} \times \text{Primary energy factor} \quad (1)$$

VI.2.1. Définition du "Modèle de conception"

Dans le cadre de notre recherche, il est pertinent de concentrer les simulations énergétiques sur les surfaces exposées de la façade, et plus particulièrement sur le mur extérieur. À cet égard, les simulations ont été effectuées en considérant deux niveaux intermédiaires juxtaposés, comme le montre la figure VI.1, appelée « *modèle de conception* », tandis que les éléments exposés des planchers supérieur et inférieur ont été considérés comme adiabatiques.

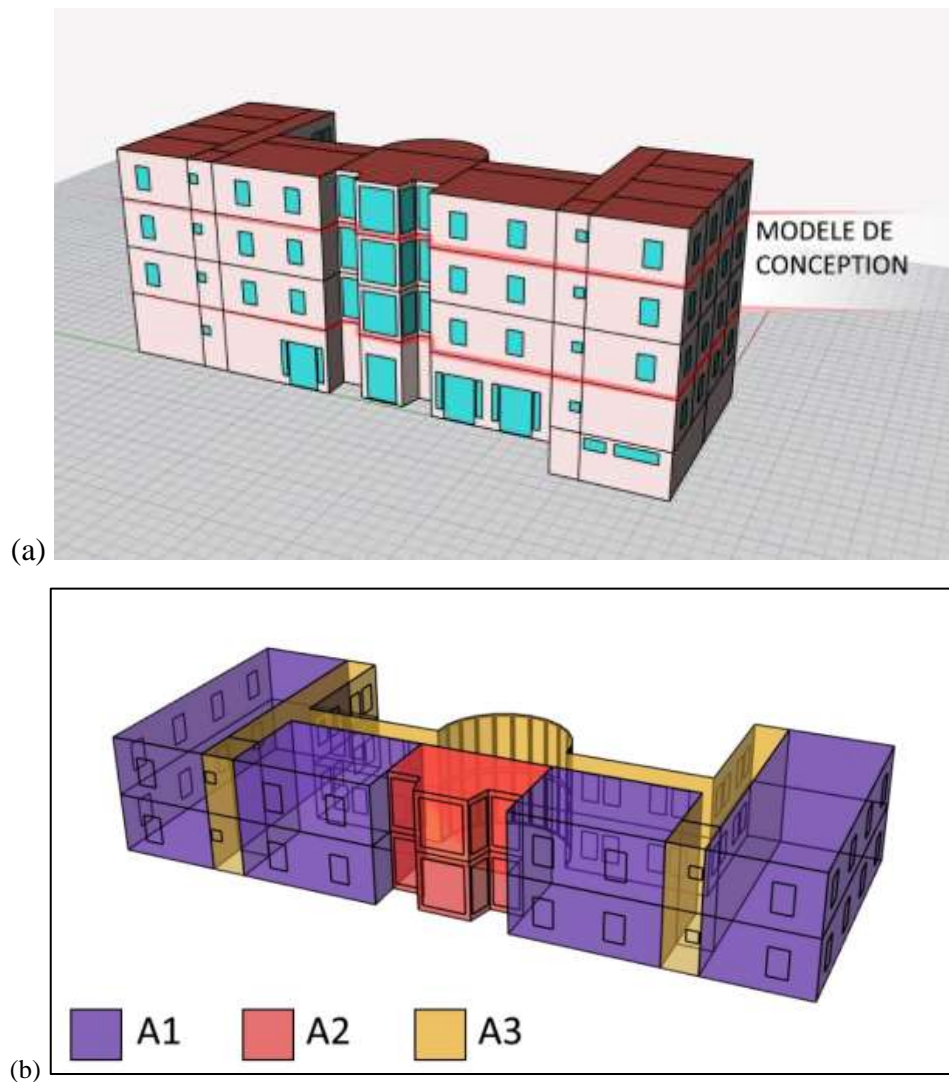


Figure VI.1. (a) Aperçu 3D du modèle de conception (b) Définition du programme des zones thermiques : A1 , A2 , A3

Comme elle suppose des environnements internes adjacents, la solution adiabatique fournira des résultats plus représentatifs dans le cas où des valeurs S/V plus élevées ou plus basses seraient considérées, tout en ignorant l'implication des changements thermiques dus aux autres surfaces exposées, telles que le toit et le rez-de-chaussée. De plus, l'adoption de telles

considérations réduira le temps de calcul permettant un processus de simulation itératif brute-force.

Le tableau VI.1 présente les paramètres thermo-physiques de l'enveloppe du modèle de conception et les paramètres de fonctionnement du bâtiment.

Tableau VI.1 Paramètres thermo-physiques et de fonctionnement du modèle énergétique du bâtiment

Catégorie	Groupe	Type	Zone de référence
Paramètres thermo-physiques	Enveloppe	U-value murs extérieurs	
		U-value murs intérieurs	
		U-value toit	
		U-value plancher inférieur (RDC)	
		U-value plancher	
		Coefficient d'absorption solaire des surfaces extérieures exposées	
		Vitrage : U-value SHGC	
Exploitation du bâtiment	Activités (utilisation quotidienne et profil d'occupation dans fig.VI 3)	Charge d'équipement par zone (<i>a</i>)	Zones A1 - A2 (intermittent) Zone C
		Densité d'éclairage par zone (<i>l</i>)	Zones A1 - A2 Zone A3
		Personnes par zone (<i>p</i>)	Zones A1 - A2 Zone A3
	Paramètres de contrôle et de fonctionnement	Hset	Zones A1 - A3
		Cset	Zone A1 - A3
		ACH (infiltration et ventilation naturelle)	Zones A1 - A2 (horaire intermittent) Zone A3 (horaire intermittent)

Ensuite, afin de définir des équipements fiables, des charges d'éclairage et des programmes d'occupation, des profils détaillés basés sur la fonction de l'espace ont été attribués spécifiquement à chaque zone thermique (figure VI.1) sur la base de mesures et d'une enquête détaillée sur place, comme indiqué dans la figure VI. 2, conformément aux paramètres indiqués dans le Tableau VI.1.

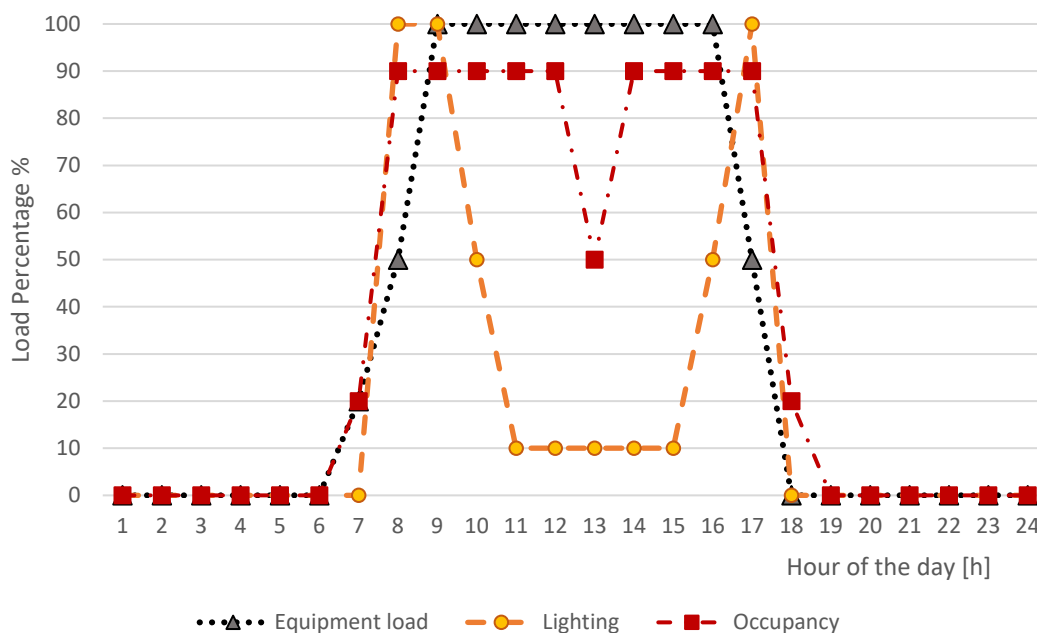


Figure.VI.3 Équipement, charges d'éclairage et programme quotidien d'occupation

En outre, au regard des résultats du chapitre V, et afin de limiter l'influence des surfaces vitrées, on a supposé des fenêtres à double vitrage avec ombrage dynamique. En conséquence, on a supposé des stores vénitiens extérieurs mobiles avec un seuil d'actionnement global de 150, basé sur le rayonnement solaire diffus maximal autorisé sur la fenêtre en termes d'efficacité énergétique de chauffage, de refroidissement et d'éclairage par rapport à l'éclairement minimal accepté et spécifique à chaque activité de zone thermique (Zone "A" : 300 lux, Zones "B", "C" : 50 lux).

VI.2.1.1. Charges de zone

Le tableau VI.3 présente les conditions limites du modèle énergétique de conception, c'est-à-dire les propriétés thermo-physiques des éléments de l'enveloppe, l'utilisation du bâtiment et les paramètres de fonctionnement à appliquer dans la simulation énergétique dynamique.

Les zones thermiques du modèle énergétique sont classées en 3 types, à savoir les zones "A, B et C" selon la fonction de l'espace où : La zone "A" : représente les espaces de bureaux avec une charge d'équipement de 10W/m^2 équivalente à la charge d'un poste de travail entièrement installé. Les zones "B" et "C", qui présentent respectivement le hall principal de chaque étage et le couloir, sont caractérisées par une charge minimale de 2W/m^2 par jour, les heures de travail allant de 8h00 à 16h30.

Des profils spécifiques de ventilation intermittente et d'infiltration ont été traités dans le cas du modèle de conception spécifique aux zones "A1, A2 et A3" comme présenté dans le Tableau VI.1 afin d'obtenir des valeurs moyennes journalières conformes aux suggestions du DTR C 3-2. En outre, les points de consigne de chauffage et de refroidissement ont été considérés comme étant respectivement égaux à 20°C et 26°C sur la base des valeurs suggérées dans la norme EN 15251 (2007).

VI.2.1.2. Configuration des murs extérieurs

- **Définition des murs, une approche d'inertie thermique**

Afin de couvrir un large éventail et mettre en évidence l'effet de l'inertie thermique, nous avons considéré 3 types de murs avec différentes stratifications partageant le même facteur de transmission thermique de $U = 1.012 \text{ W/m}^2\text{K}$, pertinent pour le cadre de notre recherche, car il permet une comparaison objective entre les performances de ces 3 configurations par rapport aux caractéristiques dynamiques de chacune.

Les configurations des murs ont été générées sur Grasshopper, au moyen d'une solution d'algorithme génétique. La fonction objectif est de minimiser l'écart entre la transmittance thermique des 3 variantes de parois tout en changeant l'épaisseur de chaque couche de stratification pour chaque paroi.

Le calcul des paramètres dynamiques du mur a été effectué en adoptant la méthode de l'admittance. Par la suite, nous définissons le facteur de décrémentation et le décalage temporel.

Tableau VI.2 Propriétés thermo-physiques des composants de l'enveloppe du bâtiment

Composants opaques de l'enveloppe	Détail	Couche de construction (De l'extérieur vers l'intérieur)	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique [W/m.K]
Mur extérieur	Variante (S1) Mur léger	Plaque de plâtre (léger)	2	0.35
		Isolation en polystyrène	e	0.04
		Bois	2.5	0.13
		Laine minérale	2	0.04
		Plaque de plâtre (léger)	2	0.35
	Variante (S2): Mur mi-massif	Enduit en ciment	1.5	1.4
		Isolation en polystyrène	e	0.04
		Brique creuse	15	0.5
		Isolation en polystyrène	1	0.04
		Brique creuse	10	0.5
	Variante (S3): Mur massif	Enduit en plâtre	2	0.35
		Enduit en ciment	1	1.4
		Isolation en polystyrène	e	0.04
		Brique pleine	45	0.56
		Enduit en ciment	1	1.4
Plancher intermédiaire	Carreau granite	2	2.1	
	Mortier en ciment	4	0.8	
	Couche de béton armé	4	1.45	
	Parpaing	16	1.15	
	Enduit en plâtre	1.5	0.35	

- **Solution d'isolation pour définir le coefficient de transmission thermique du mur**

L'optimisation énergétique est réalisée au moyen d'une variation incrémentale de l'épaisseur de l'isolation comme élément clé pour moduler l'influence du mur extérieur sur la demande d'énergie thermique du bâtiment. En détail, nous avons supposé la mise en œuvre du polystyrène expansé ($\rho = 35 \text{ kg/m}^3$, $c = 1040 \text{ J/kgK}$, $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$) (Kumar et al., 2020) comme couche isolante pour chaque système de mur considéré (S1, S2 et S3), comme le montre la Fig. 9. Le choix de ce matériau d'isolation est basé sur les facteurs suivants :

- Performance thermique et coût du cycle de vie : bien que son énergie intrinsèque soit très élevée, il s'est avéré être l'isolant le plus rentable (Kumar et al., 2020), en particulier dans les climats dominés par la climatisation.
- La disponibilité et l'utilisation généralisée dans le contexte algérien.
- Sa simplicité de mise en œuvre.
- La limitation de l'impact sur la masse thermique du mur justifie le choix d'une variante basse densité de l'isolant.

Du point de vue de l'énergie intrinsèque, il est caractérisé par un impact énergétique égal à 19,16 kWh/kg (from cradle to gate) (Kumar et al., 2020).

En outre, nous avons considéré la couche d'isolation, dont l'épaisseur varie entre 1 cm et 12 cm avec un incrément de 0,5 cm (les propriétés thermo-physiques et dynamiques des différentes configurations de murs sont présentées dans le tableau VI.3), ce qui permet d'obtenir des valeurs optimales plus précises.

Tableau VI.3 Variations du mur extérieur en fonction de l'épaisseur de l'isolant, des propriétés thermo-physiques et dynamiques.

	Epaisseur de l'isolant (cm)	Epaisseur du mur (cm)	U-value (W/m².K)
	0	8.5	1.012
	1	9.5	0.80
	1.5	10	0.73
	2	10.5	0.67
	2.5	11	0.62
	3	11.5	0.58
	3.5	12	0.54
	4	12.5	0.50
	4.5	13	0.47
	5	13.5	0.45
Variante « S1 »	5.5	14	0.42
Mur léger	6	14.5	0.40
	6.5	15	0.38
	7	15.5	0.37
	7.5	16	0.35
	8	16.5	0.34
	8.5	17	0.32
	9	17.5	0.31
	9.5	18	0.30
	10	18.5	0.29
	10.5	19	0.28
	11	19.5	0.27
	11.5	20	0.26
	12	20.5	0.25

	Epaisseur de l'isolation (cm)	Epaisseur du mur (cm)	U-value (W/m².K)
Variante "S2" Mur mi-lourd	0	29.5	1.01
	1	30.5	0.81
	1.5	31	0.73
	2	31.5	0.67
	2.5	32	0.62
	3	32.5	0.58
	3.5	33	0.54
	4	33.5	0.50
	4.5	34	0.47
	5	34.5	0.45
	5.5	35	0.42
	6	35.5	0.40
	6.5	36	0.38
	7	36.5	0.37
	7.5	37	0.35
	8	37.5	0.34
	8.5	38	0.32
	9	38.5	0.31
	9.5	39	0.30
10	39.5	0.29	
10.5	40	0.28	
11	40.5	0.27	
11.5	41	0.26	
12	41.5	0.25	
Variante « S3 » Mur massif	0	47	18.653
	1	48	20.051
	1.5	48.5	20.267
	2	49	20.406
	2.5	49.5	20.507
	3	50	20.586
	3.5	50.5	20.654
	4	51	20.714
	4.5	51.5	20.77
	5	52	20.823
	5.5	52.5	20.875
	6	53	20.928
	6.5	53.5	20.98
7	54	21.034	
7.5	54.5	21.088	
8	55	21.145	

8.5	55.5	21.203
9	56	21.263
9.5	56.5	21.324
10	57	21.388
10.5	57.5	21.454
11	58	21.523
11.5	58.5	21.593
12	59	21.666

- **Coefficient d'absorption solaire comme définition de la couleur d'un revêtement extérieur**

Comme l'énergie solaire absorbée dépend de la couleur de la surface, nous définissons plusieurs valeurs de coefficient d'absorption solaire, afin d'évaluer l'impact de ce facteur sur l'efficacité énergétique du bâtiment dans le cas d'un climat chaud et sec. On s'attend à ce qu'une telle valeur augmente fortement la consommation énergétique globale du bâtiment, cependant, il est nécessaire d'étudier son effet sur le comportement thermique des composants de la paroi opaque. Les valeurs adoptées vont de 0,3 pour une surface blanche et lisse à 0,6 pour les couleurs verte, rouge et brune, avec une augmentation progressive de 0,1.

VI.3. Résultats et discussion

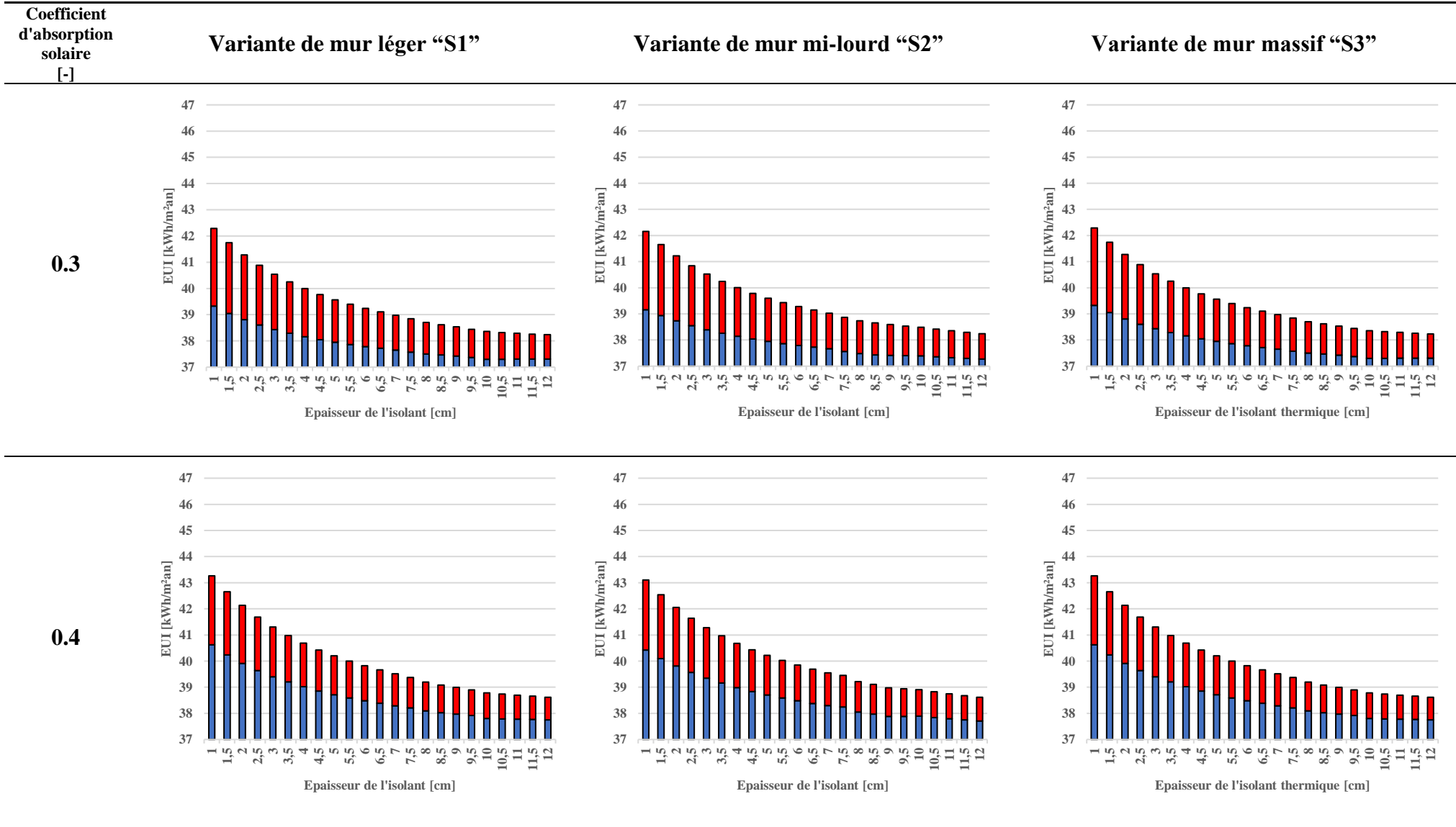
Comme déjà présenté, l'analyse de l'influence de chaque configuration de mur extérieur sur la performance énergétique du bâtiment a été réalisée à travers un ensemble de simulations énergétiques sur trois configurations de mur extérieur avec une transmission thermique identique et des propriétés dynamiques différentes, à savoir "S1", "S2" et "S3". En plus des différents paramètres de performance d'inertie thermique des 3 murs, nous avons considéré les variations de l'épaisseur de la couche d'isolation et la variation du coefficient d'absorption solaire.

L'évaluation, qui permet de définir la configuration optimale des murs extérieurs en termes de chauffage, de refroidissement et d'impacts environnementaux, se déroule en quatre étapes successives :

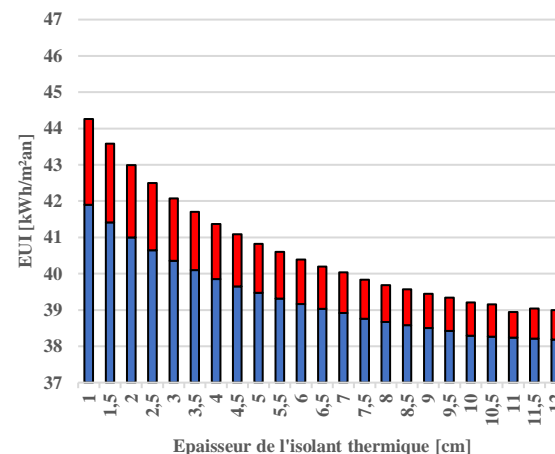
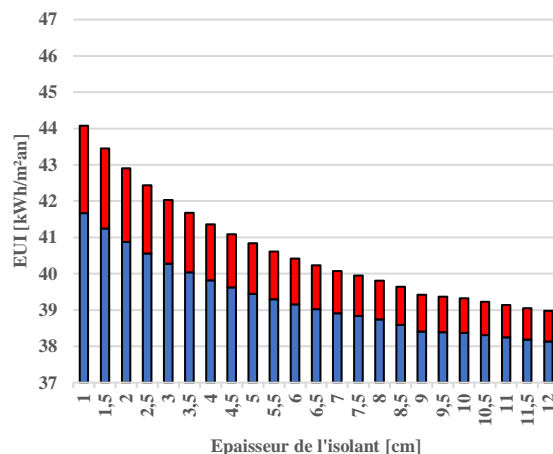
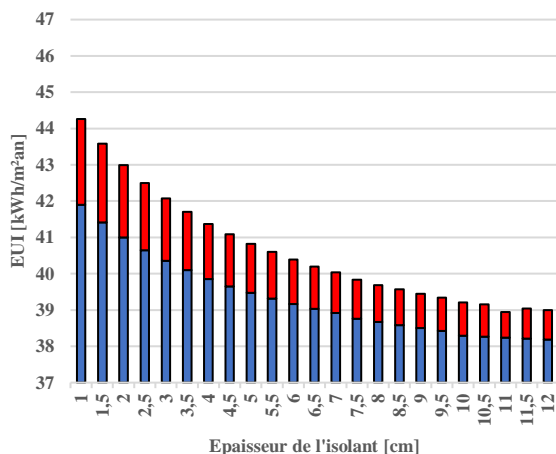
1. La consommation d'énergie thermique du bâtiment est calculée en tenant compte de la carte théorique COP/EER introduite dans la phase de calibration de la recherche (CHAPITRE IV) pour chaque configuration de mur. A cet effet, les résultats reportés dans la Figure VI.3 pour chaque configuration de mur en termes de consommation annuelle d'énergie électrique (intensité d'utilisation de l'énergie) dédiée au chauffage et

à la climatisation et en fonction de l'épaisseur d'isolation du mur extérieur sur la base des valeurs de coefficient d'absorption solaire considérées.

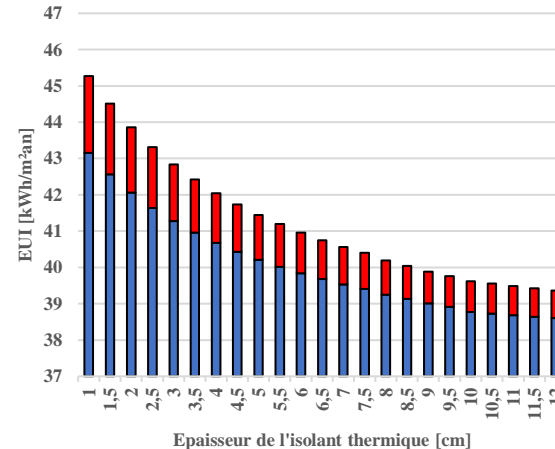
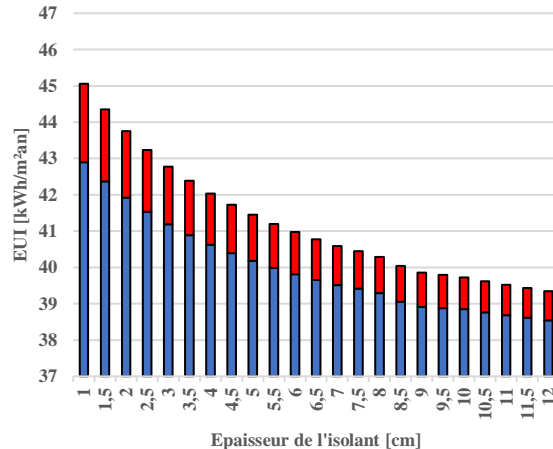
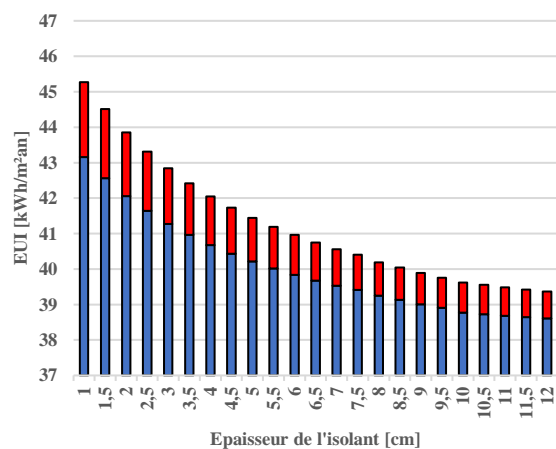
2. Sur la base de ces résultats, nous établissons une analyse approfondie de l'augmentation incrémentale du coefficient d'absorption solaire sur chaque configuration de mur (inertie thermique et transmittance thermique différentes), afin d'évaluer la solution la plus appropriée en termes de consommation énergétique pour la phase opérationnelle dédiée au chauffage et au refroidissement.
3. Par la suite, le meilleur scénario est adopté pour l'analyse des propriétés thermo-physiques et dynamiques du mur extérieur en extrayant la solution optimale en termes d'économies d'énergie.
4. Enfin, nous calculons l'énergie primaire due à la consommation d'énergie opérationnelle en termes de chauffage et de refroidissement, ainsi que l'énergie intrinsèque impliquée par l'épaisseur de la couche d'isolation adoptée pour chaque configuration de mur et définissons la solution optimale en termes d'aspects énergétiques et environnementaux.



0.5



0.6



■ Refroidissement

■ Chauffage

Figure VI.4. Consommation annuelle d'énergie électrique en termes de chauffage et de refroidissement en fonction de l'épaisseur de l'isolation et du coefficient d'absorption solaire pour les 3 configurations de murs ("S1", "S2" et "S3").

VI.3.1. Impact du coefficient d'absorption solaire sur la performance énergétique du bâtiment : vers la définition du scénario optimal

D'après les résultats présentés dans la figure VI.3, nous pouvons d'abord observer que l'augmentation incrémentale du coefficient d'absorption solaire de la couche externe implique une augmentation de 2,3% de la consommation totale d'énergie à 1cm d'épaisseur d'isolation, ce taux diminue en fonction de chaque variation de transmission thermique de la paroi pour atteindre un taux de 0,9% à 12cm. De plus, comme on peut le voir dans l'analyse énergétique saisonnière, cette augmentation implique également une augmentation linéaire de la consommation d'énergie dédiée au refroidissement, avec une diminution parallèle du chauffage, et les deux taux diminuent logarithmiquement avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation.

En détail, pour le cas des trois variantes de mur "S1", "S2" et "S3", comme présenté dans la figure VI.4, de fortes corrélations linéaires négatives et positives sont attribuées respectivement aux tendances de chauffage et de refroidissement en fonction de l'absorption solaire de la couche externe, avec R^2 supérieur à 0,999. De plus, leur taux d'augmentation/diminution, tel qu'introduit précédemment, fluctue suivant une tendance logarithmique avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'isolation, donc, plus les valeurs d'isolation sont élevées, plus le taux d'augmentation/diminution est faible respectivement pour le refroidissement/chauffage.

De manière plus détaillée, dans le cas du système de mur "S1", le taux de diminution de la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment pour chaque augmentation de 0,1 du coefficient d'absorption solaire commence à une valeur moyenne de 9,2% pour une épaisseur d'isolation de 1cm, et ce taux diminue de manière logarithmique pour atteindre une valeur moyenne de 6,4% à 12cm. Quant au refroidissement, il passe de 3,4% à 1cm à 1,9%.

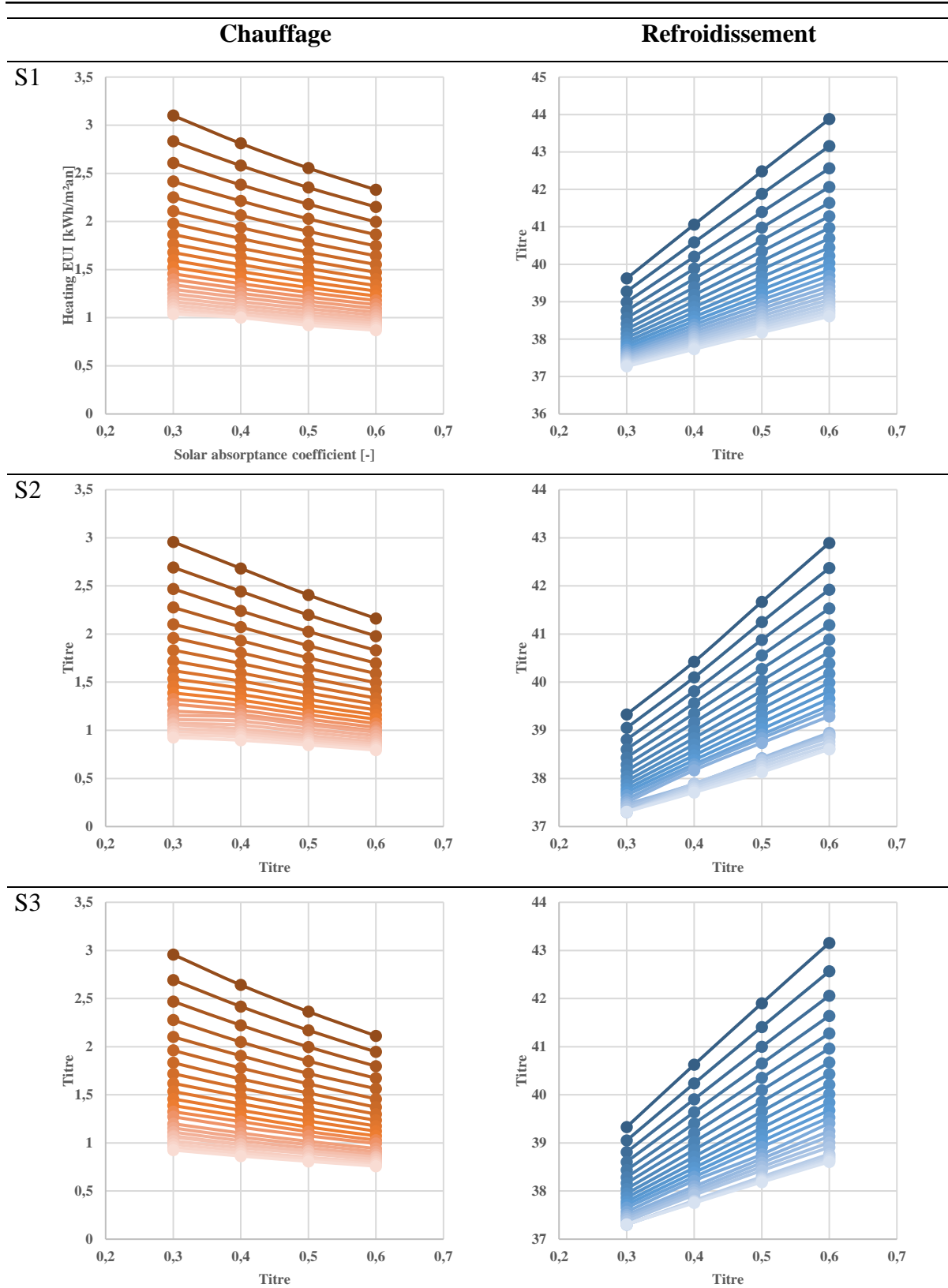


Figure VI.5. Consommation annuelle d'énergie électrique en termes de refroidissement et de chauffage en fonction du coefficient d'absorption solaire

Similairement, pour les configurations de murs **mi-lourds "S2"** et **lourds "S3"**, le taux de diminution de la consommation d'énergie de chauffage avec chaque supplément de 0,1 dans le coefficient d'absorption solaire commence à une valeur de 10% et 10,4% à une épaisseur d'isolation de 1cm. Ce taux diminue également de manière logarithmique pour atteindre une valeur moyenne de 7% et 6,4% à 12cm (pour "S2" et "S3" respectivement). Quant au refroidissement, le taux d'augmentation passe de 2,9% et 3,1% à 1cm à 1,1% 1,14 respectivement.

Ce phénomène peut être expliqué par :

- L'impact de l'isolation thermique sur la diminution de la consommation globale d'énergie dans le cas du climat chaud et sec de Biskra à la fois pour le chauffage et le refroidissement dans le cas de l'utilisation intermittente du système HVAC pour ce bâtiment de bureaux, et donc des taux d'augmentation plus faibles avec des valeurs d'absorption solaire plus élevées.
- L'effet d'inertie thermique (renforcé par l'augmentation progressive de l'épaisseur de la couche d'isolation) qui, bien qu'il emmagasine la chaleur des gains solaires et internes, est fortement dépendant des variations de température ; par conséquent, à des valeurs plus élevées, cet effet devient paradoxal dans un tel climat.

De plus, nous pouvons conclure, à partir des premiers résultats, que la valeur d'absorption solaire la plus appropriée est la plus basse, ainsi, il est approprié d'appliquer des matériaux de couleur claire sur les surfaces opaques de la façade pour le cas du climat chaud et sec de Biskra,

Par conséquent, la valeur de 3 pour l'absorption solaire est adoptée dans les étapes suivantes de l'analyse.

VI.3.2. Impact de l'inertie thermique du mur extérieur et de l'épaisseur de l'isolation sur la consommation d'énergie du bâtiment (phase d'exploitation)

Sur la base de la conclusion obtenue précédemment, les résultats de la consommation énergétique globale, due au fonctionnement uniquement, en considérant la valeur optimale du coefficient d'absorption solaire, seront adoptés pour l'analyse de l'inertie thermique du mur extérieur et de la transmission thermique (induite par l'isolation de la couche d'épaisseur) sont analysés.

Par conséquent, à travers une analyse comparative, les résultats rapportés dans la figure (VI.4) concernant la consommation d'énergie totale et saisonnière dédiée au chauffage et à la climatisation pour le cas d'un coefficient d'absorption solaire de 0,3 seront discutés en considérant

les trois systèmes de mur "S1", "S2" et "S3", caractérisés par différents paramètres de performance d'inertie thermique, en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolation. En conséquence, la solution optimale en termes d'épaisseur d'isolation sera évaluée respectivement pour chaque système de mur.

D'après les résultats présentés dans la figure VI.3, on peut observer une diminution logarithmique de la consommation totale d'énergie de la limite inférieure à la limite supérieure des épaisseurs d'isolation considérées. Cette tendance est mise en évidence par une diminution simultanée de la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement pour chaque configuration de mur avec l'augmentation incrémentielle de l'épaisseur de la couche d'isolation thermique de 1 cm pour une valeur U du mur de 0,81 W/m²K à 12 cm pour une valeur U de 0,25 W/m²K. Cette tendance logarithmique est due à l'évolution de la transmission thermique du mur en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolation, comme présenté dans le tableau VI.3, dans la section VI.2.1.2.

De plus, en comparant leur comportement thermique, les trois configurations de mur réagissent différemment aux fluctuations de température caractérisant le climat considéré. De plus, bien que nous observions une légère différence d'efficacité, le mur mi-lourd "S2" consomme initialement moins d'énergie, suivi par les murs légers puis les murs lourds.

En détail, pour la **variante légère "S1"**, la consommation annuelle d'énergie du bâtiment, principalement consacrée au refroidissement (92,7% à 97,3%) en raison du climat chaud et sec qui caractérise la ville de Biskra, diminue d'environ 10,3% entre les limites inférieure et supérieure de l'épaisseur de l'isolation. En outre, la consommation d'énergie globale atteint 42,7 kWh/m²y à 1 cm d'isolation (valeur U = 0,81 W/m²K) et diminue constamment avec l'augmentation incrémentielle de l'épaisseur de la couche d'isolation jusqu'à atteindre une solution efficace sur le plan énergétique à 8 cm (valeur U = 0,33 W/m²K) avec 38,93 kWh/m²y. En outre, l'échange de valeurs U inférieures pour les murs extérieurs devient négligeable car il ne permet d'atteindre que 38,26 kWh/m² à 12 cm (valeur U = 0,25 W/m²K). Plus en détail, d'après l'analyse énergétique saisonnière, la charge de refroidissement montre une diminution notable de 39,61 kWh/m²y à 37,26 kWh/m²y, avec une charge de chauffage négligeable diminuant de 3,1 kWh/m²y à 1,03 kWh/m²y.

Par rapport au système de mur léger "S1", le **mur mi-lourd "S2"** permet une économie d'énergie d'environ 1,3% au niveau d'isolation le plus bas, diminuant à 0,1% à 12cm. En détail, la

consommation d'énergie globale à 1cm d'isolation est de 42,15 kWh/m²y, et diminue de façon logarithmique jusqu'à atteindre 38,24 kWh/m²y. Cependant, pour ce cas, la solution énergétiquement efficace est obtenue à une épaisseur d'isolation de 7,5cm égale à un niveau de transmission thermique du mur de 0,34 W/m²K pour 38,87 kWh/m², au-delà duquel, le commerce devient négligeable.

Des consommations électriques de refroidissement et de chauffage plus faibles sont enregistrées dans ce cas, le refroidissement représentant 92,7% de la consommation totale d'énergie avec 39,16 kWh/m²y, et 97,3% avec 37,27 kWh/m² respectivement pour les limites inférieure et supérieure des épaisseurs d'isolation considérées. Quant au chauffage, les valeurs chutent également de 2,99 kWh/m²y à 0,97 kWh/m²y.

En comparant les taux de refroidissement et de chauffage pour les cas "S1" et "S2", à des niveaux d'isolation plus élevés, nous observons une augmentation et une diminution négligeables des deux composantes de la consommation d'énergie respectivement. Ceci est dû à l'effet thermostatique mineur résultant de la sur-isolation qui aide, dans le cas de murs ayant une bonne performance d'inertie thermique, à retenir la chaleur due aux gains solaires et internes pendant de plus longues périodes, augmentant ainsi la demande d'énergie de refroidissement en été, et diminuant les besoins de chauffage en hiver. De plus, les valeurs négligeables attribuées à cet effet sont uniquement dues à l'utilisation intermittente et aux zones non climatisées relativement élevées.

Le mur lourd "S3" présente une performance énergétique légèrement inférieure à celle de "S1", car sa consommation énergétique globale est de 0,3 % à 0,1 % supérieure à celle de "S1", mais il est légèrement meilleur (moins de 0,1 %) que "S2", respectivement pour les limites supérieure et inférieure des épaisseurs des couches d'isolation considérées.

En détail, sa performance énergétique globale est réduite de 42,28 kWh/m²y à 38,23 kWh/m²y en fonction de l'augmentation progressive de l'épaisseur de la couche d'isolation thermique externe (de 1 cm à 12 cm) et la solution énergétiquement efficace est atteinte à un niveau de 7,5 cm (valeur U = 0,34 W/m²K) pour 38,93 kWh/m²an.

En outre, en analysant respectivement les attributs saisonniers d'utilisation de l'énergie électrique dédiée au refroidissement et au chauffage, leurs valeurs chutent de 39,33 kWh/m²y à

37,31 kWh/m²y et de 2,96 kWh/m²y à 0,92 kWh/m²y respectivement pour les limites supérieure et inférieure de l'épaisseur de la couche isolante. En conséquence, le refroidissement, en tant qu'attribut omnipotent, représente 93% à 97,6%.

En raison de son décalage temporel (déphasage) et de son facteur de décrémentation relativement élevés par rapport aux autres configurations de mur, la capacité de la variante "S3" à retenir la chaleur pendant des périodes encore plus longues devient paradoxale, bien qu'elle réduise la demande d'énergie de chauffage en hiver, son impact est inversement aussi efficace pour augmenter la demande de refroidissement.

Ceci peut être expliqué par l'absorption continue des gains de chaleur du mur sur une base quotidienne. Comme le climat de Biskra est caractérisé par des températures moyennes annuelles et mensuelles relativement proches des valeurs de consigne en hiver et bien au-dessus de la zone de confort en été, la dissipation de cette chaleur devient négligeable même avec le régime intermittent du bâtiment.

De ces résultats, nous pouvons conclure que, pour le climat chaud et sec de Biskra, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation, et donc des valeurs de transmission thermique plus faibles, avec un choix approprié de la composition du mur en ce qui concerne son inertie thermique sont des attributs décisifs à prendre en compte pour atteindre l'efficacité énergétique du bâtiment.

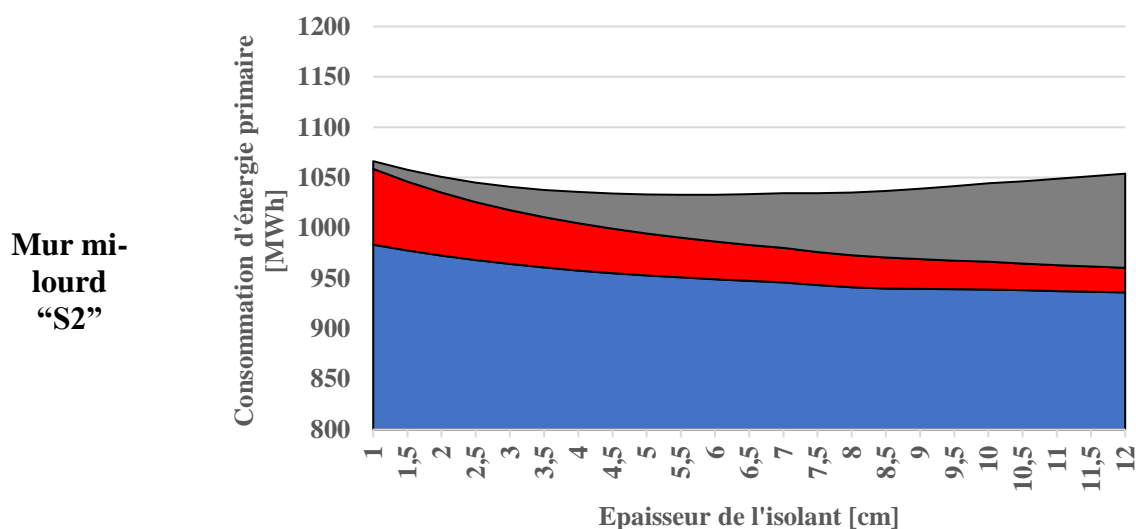
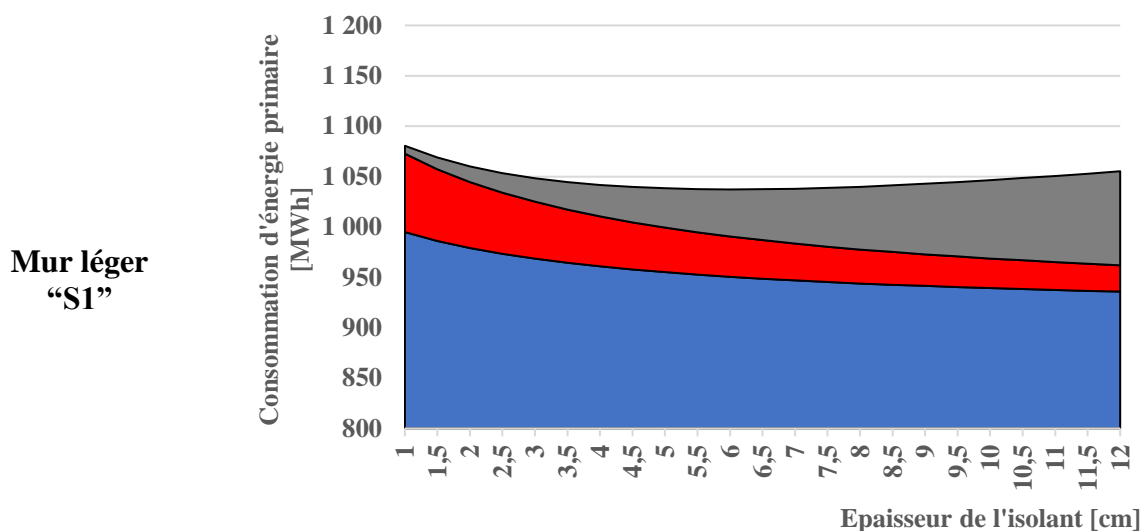
En outre, pour les cas étudiés, la solution optimale en termes d'énergie en ce qui concerne la phase opérationnelle du bâtiment est un mur moyennement lourd avec un facteur de décalage temporel et de décrémentation allant respectivement de 9h, 0.3 et 12h, 0.1, couplé à une épaisseur d'isolation de 7,5 cm. Cependant, cette valeur ne tient pas compte de l'énergie intrinsèque impliquée par la fabrication de la solution d'isolation, qui est également un facteur décisif. Par conséquent, cette question sera étudiée en détail dans la section suivante, et la solution d'isolation optimale sera définie en tenant compte de sa durée de vie, puis en comparant les résultats obtenus pour chaque système de mur.

VI.3.3. Impact de l'inertie thermique du mur et de l'épaisseur de l'isolant sur la consommation d'énergie primaire

La consommation d'énergie primaire pour les trois murs par rapport au coefficient d'absorption solaire optimal de 0,3 est calculée sur la base de l'agrégation de l'énergie opérationnelle et de l'énergie intrinsèque. Dans le détail, nous considérons l'addition de la

consommation d'énergie du modèle en termes de chauffage et de refroidissement obtenue sur la phase d'exploitation du bâtiment pour une durée de vie de 30 ans, et l'énergie intrinsèque impliquée par l'épaisseur d'isolation de la solution de polystyrène adoptée nécessaire pour couvrir toute la zone des murs extérieurs.

En conséquence, les résultats sont représentés dans la figure VI.5, respectivement pour les configurations de murs légers "S1", mi-lourds "S2" et massifs "S3".



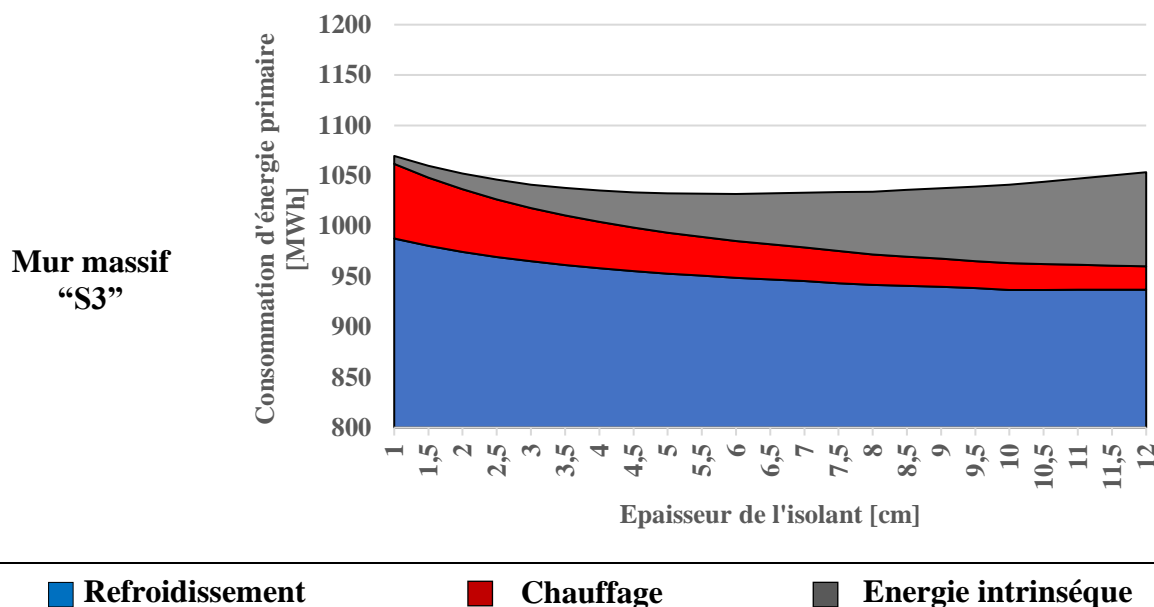


Figure VI.6 : Consommation d'énergie primaire du bâtiment pour les trois variantes de murs "S1", "S2" et "S3".

L'analyse des résultats confirme que, du point de vue de l'énergie opérationnelle, l'impact de l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation et donc de la réduction de la transmission thermique du mur est essentiel pour la réduction de la consommation d'énergie primaire dédiée au chauffage et au refroidissement. En détail pour les 3 variantes de murs considérées, la consommation totale d'exploitation est réduite de 1072 MWh à 961 MWh pour "S1", et 1058 MWh à 960 MWh pour "S2", et 1062 MWh à 960 MWh pour "S3", soit une réduction d'environ 100 MWh pour une durée de vie de 30 ans sur la base du modèle considéré.

Par ailleurs, la quote-part de l'énergie intrinsèque de l'épaisseur de l'isolation en polystyrène sur le besoin énergétique global est assez faible ; elle varie de 7,8 MWh et 93,3 MWh de 1 cm à 12 cm d'isolation, avec un impact relatif sur la consommation énergétique globale compris entre 0,7% et 8,5%, respectivement, quelle que soit la configuration des murs.

Ainsi, comme on peut le voir sur la figure VI.5, l'énergie primaire globale suit une tendance parabolique convexe de la limite inférieure à la limite supérieure de l'isolation du mur. En détail, pour "S1" la consommation globale est de 1080 MWh à 1cm, et diminue pour atteindre une valeur optimale de 1037 MWh à 6cm, au-delà de laquelle l'inflexion devient frappante et augmente jusqu'à une valeur de 1055 MWh à 12cm.

De manière similaire pour "S2" et "S3", elle est réduite respectivement de 1066 MWh et 1069 MWh à 1cm, et atteint un équilibre optimal à 5,5cm et 6cm avec une consommation énergétique globale de 1033 MWh augmentant ensuite à 1053 MWh.

Par conséquent, il semble que la solution "S2" soit la meilleure dans l'ensemble, car elle présente des exigences d'épaisseur d'isolation plus faibles ainsi qu'une consommation d'énergie primaire globale plus faible. En outre, nous pouvons conclure que, bien que la capacité thermique et la transmission thermique optimales réduisent la consommation d'énergie opérationnelle avec des amplitudes différentes, l'impact d'une transmission thermique plus faible étant plus pertinent, la prise en compte de l'énergie intrinsèque impliquée par ses composants est essentielle, et un juste équilibre entre l'énergie consommée dans les deux phases du cycle de vie doit être défini.

Partie 2 : Évaluation de l'effet de la protection solaire sur la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment en atténuant les radiations solaires incidentes sur les surfaces opaques.

VI.4. Effet de la protection solaire sur la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment

La performance énergétique des composants des façades est fortement influencée par les environnements intérieur et extérieur. Cet effet est accentué dans le cas des gains internes élevés qu'impliquent l'occupation, l'équipement et l'éclairage artificiel, et les attributs climatiques extrêmes du climat chaud et sec, principalement caractérisé par des radiations solaires intenses et des températures estivales étouffantes qui dépassent en moyenne la zone de confort des occupants des bâtiments. De plus, dans le cas d'un bâtiment de bureaux dans un tel contexte, il est essentiel de considérer son régime intermittent car il implique d'autres paramètres à prendre en compte.

Comme il a été conclu dans la section précédente, en ce qui concerne les paramètres les plus influents pour ce type de bâtiment et la classe climatique, l'un des facteurs les plus influents est l'absorption solaire spécifique à la couleur et à la texture du revêtement extérieur. Cette considération confirme l'importance d'atténuer le plus possible les radiations solaires intenses caractéristiques du climat de Biskra afin de réduire les charges de refroidissement omnipotentes qui en découlent.

D'autres considérations impliquent l'adoption d'une approche d'auto-ombrage qui justifie une conception géométrique de la façade du bâtiment. Cette approche sert principalement à neutraliser l'effet indésirable des rayons solaires directs en fonction de la course solaire spécifique à l'emplacement (Aksamija, 2013). À cet effet, quelques recherches dans la littérature ont adopté cette solution pour différents climats en suivant différentes approches (Capeluto, 2003 ; Caruso et al, 2015 ; Lavafpour et al, 2015), et ont prouvé son efficacité jusqu'à un certain point dans la réduction de la demande globale d'énergie thermique.

Cependant, ces études considéraient la façade du bâtiment dans son ensemble, et l'abordaient du point de vue de la première phase de conception. Par ailleurs, d'autres recherches récentes ont considéré l'impact de l'ombrage uniquement sur les surfaces opaques des murs, en considérant les ailettes mises en œuvre comme des dispositifs d'ombrage (Liu et al, 2019), ou en considérant le modèle de construction du mur (Merhan et al, 2020). Cependant, ces recherches ne prennent pas en compte son impact sur l'horaire intermittent des bâtiments de bureaux ni ne quantifient le potentiel d'ombrage nécessaire pour le climat chaud et sec.

Dans cette partie de l'étude, nous évaluons le potentiel d'économie d'énergie thermique impliqué par l'application d'une solution d'ombrage sur les parois opaques de la façade comme une stratégie de conception passive complémentaire imitant le concept d'auto-ombrage en minimisant le gain solaire pour différentes orientations. Enfin, nous définissons une approche de base pour déterminer le coefficient d'ombrage optimal qui équilibre la consommation d'énergie en termes de chauffage et de refroidissement pour notre cas d'étude.

VI.5. Elaboration du protocole d'analyse

Comme introduit, cette partie de la recherche étudie l'influence de la mise en œuvre de dispositifs d'ombrage, en tant qu'alternative à l'approche d'auto-ombrage pour le mur extérieur de la façade, sur la consommation d'énergie annuelle dédiée aux besoins thermiques. L'objectif est d'évaluer le potentiel d'économie d'énergie lié au coefficient d'ombrage d'une telle considération pour le cas d'un bâtiment de bureaux dans le climat chaud et sec de Biskra.

Par conséquent, dans le cadre de cette recherche, sur la base d'une méthode complète dérivée des travaux de recherche de Liu et al, (2019) et Merhan et al, (2020), deux types de dispositifs d'ombrage ; Horizontal (porte-à-faux) et vertical (ailettes latérales) sont appliqués séparément et

simultanément sur le mur de façade opaque d'un modèle de cellule test prédéfini et variant en longueur plate (développé dans les sections 5.1 et 5.2). En conséquence, une double quantification a été incluse dans l'évaluation énergétique à travers un algorithme génératif sur Grasshopper/Rhinoceros :

1. La demande en énergie thermique (chauffage et refroidissement) du mur de façade opaque ombragé est évaluée au moyen de simulations énergétiques réalisées sur EnergyPlus à travers l'interface paramétrique de Grasshopper/Rhinoceros. Cet outil a été validé, et sa précision dans la simulation du bilan énergétique entre les dispositifs d'ombrage et les composants des façades a été prouvée dans des recherches mondiales. Il en résulte 49 options correspondant à la variation de la longueur des lames d'ombrage horizontales, verticales et mixtes (allant de 0 à 1,2 m) ; l'évaluation a été effectuée pour les orientations des façades du bâtiment de cas d'étude, en plus des 8 orientations cardinales et sub-cardinales (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).
2. En parallèle, le rayonnement solaire incident sur la façade du bâtiment est calculé par le biais de "Ladybug radiation analysis" (aperçu dans la Figure VI.6), y compris le rayonnement direct du faisceau et le rayonnement diffus du ciel. Ensuite, le coefficient d'ombrage (SC) pour les scénarios d'ombrage horizontal (SCh), vertical (SCv) et mixte (SCm) a été calculé selon chaque orientation considérée, en se basant sur la méthode proposée par Garde et al, 2005 et adaptée pour la surface opaque suivant l'équation (1):

Shading Coefficient(SC)

$$= \frac{\text{Rayonnement solaire incident sur le mur AVEC solution d'ombrage}}{\text{Rayonnement solaire incident sur le mur SANS solution d'ombrage}}$$

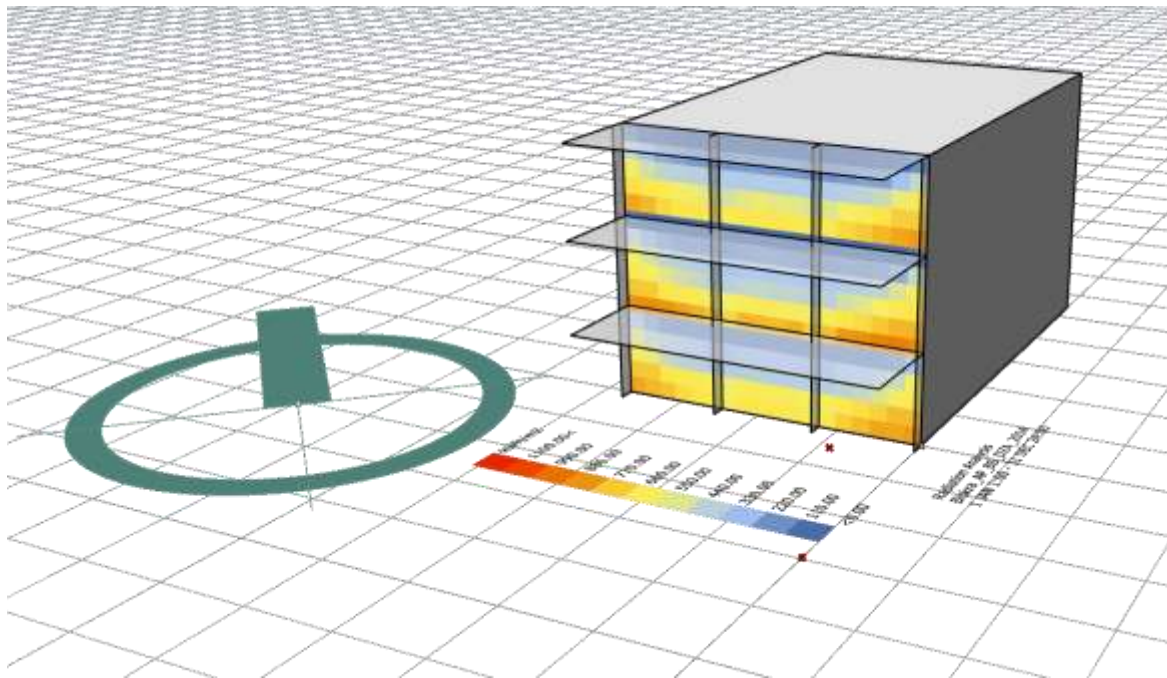


Figure VI.7: Aperçu du résultat graphique de l'analyse de l'irradiation solaire sous Ladybug sur l'interface de Rhinoceros/Grasshopper

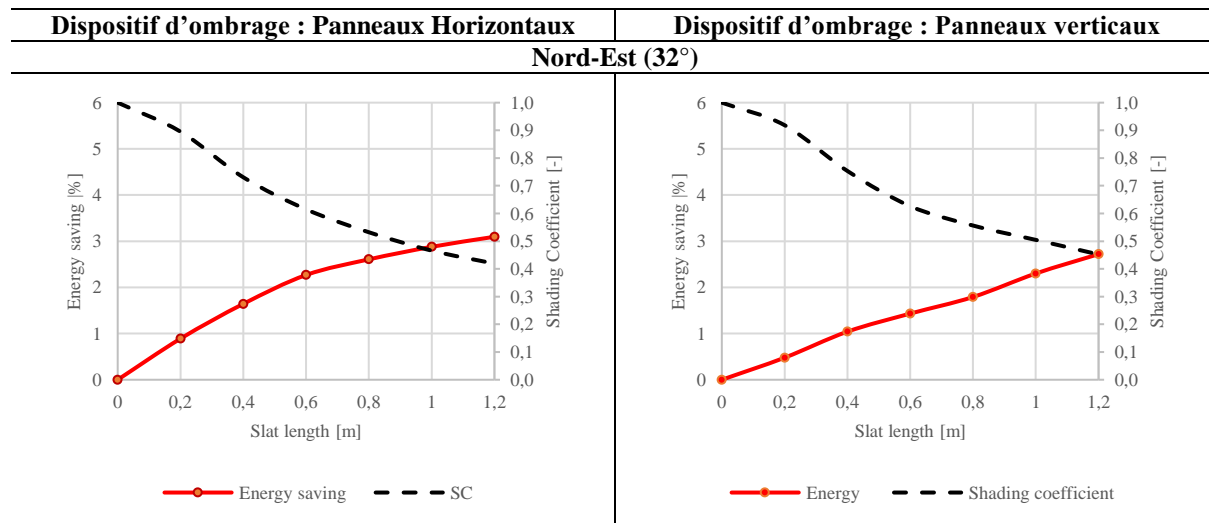
VI.6. Résultats

La simulation énergétique a été effectuée sur la base d'un fichier de données météorologiques TMY pour la période de 2004 à 2018 pour les orientations spécifiques du cas d'étude (NE 32°, SE 122°, SW 212° et NW 302°), et les orientations sub-cardinales (N, NE, E, SE, S, SW, W et NW, le nord étant considéré comme le point de départ à 0°). En conséquence, la consommation annuelle d'énergie en termes de chauffage et de refroidissement est calculée pour la cellule test opaque proposée sur la base du modèle de performance HVAC variable proposé, ainsi que le rayonnement solaire annuel cumulé sur la façade principale impliqué par la variation des panneaux horizontaux et verticaux, les résultats sont présentés dans les Figures VI.9 et VI.11.

L'analyse de l'énergie et du rayonnement solaire est présentée pour chaque orientation considérée dans les Figures VI.10 et VI.12, et les résultats sont discutés en termes de potentiel d'économie d'énergie annuelle en fonction de la métrique du coefficient d'ombrage avec la longueur de panneau d'ombrage attribuée. En conséquence, l'évaluation est traitée sur la base des 3 scénarios considérés (Horizontal, Vertical et Mixte).

1. Résultats pour les orientations du cas d'étude

a. Effet des panneaux horizontaux et verticaux sur les parois opaques



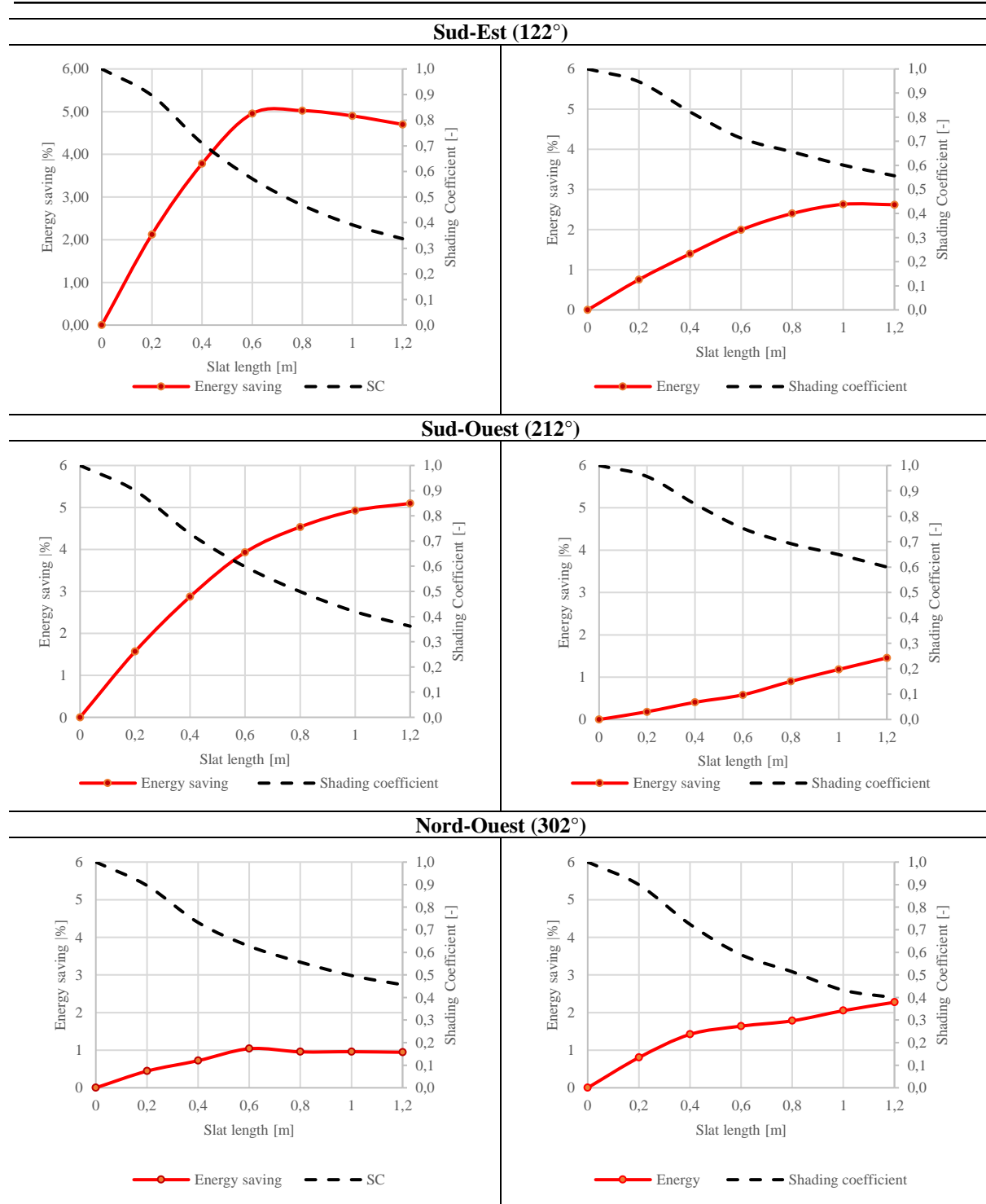
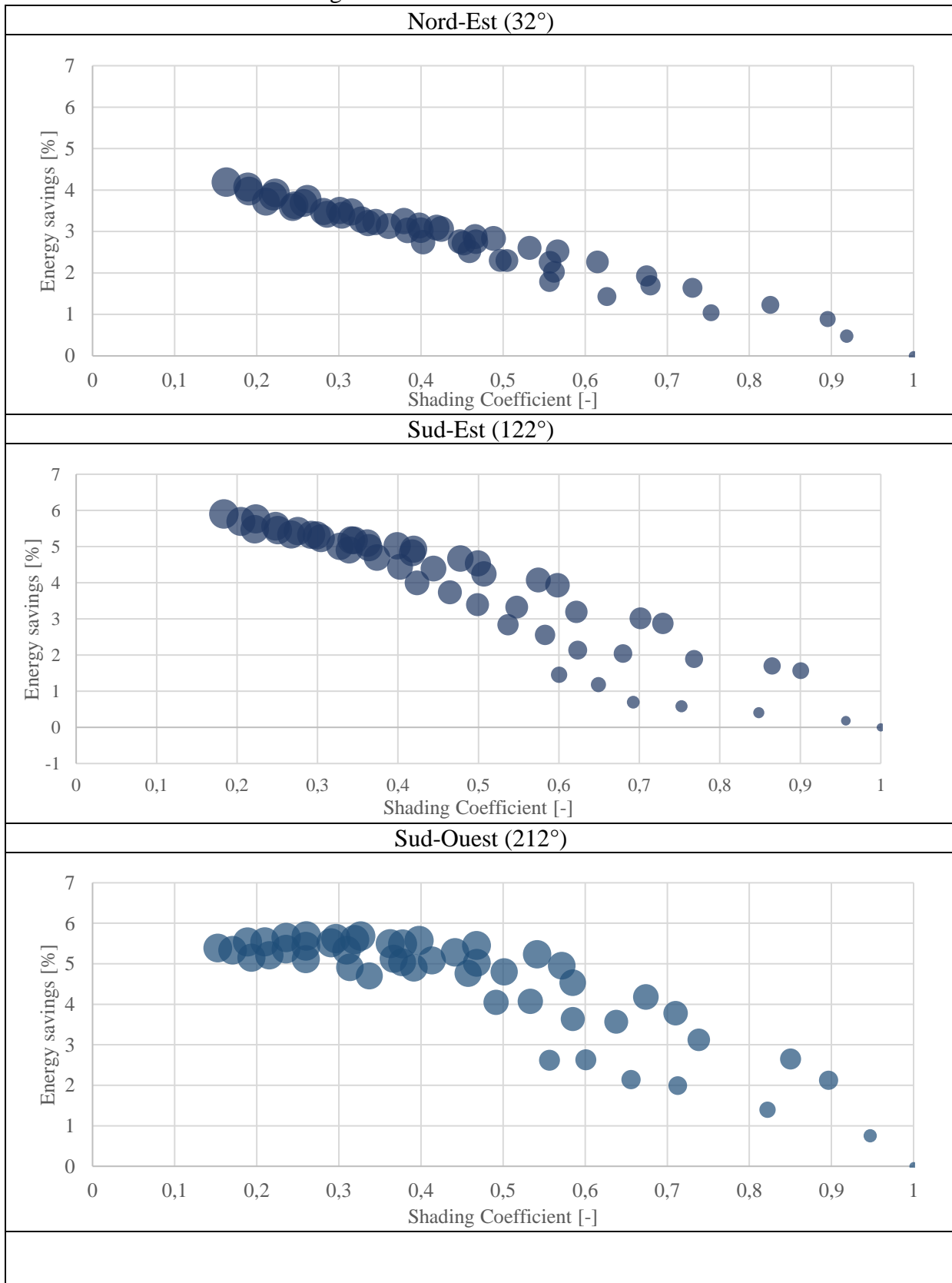


Figure VI.8. Potentiel d'économie d'énergie pour les solutions d'ombrage Horizontales et Verticales et leurs SCh et SCv relatifs en fonction de la longueur des lamelles pour les orientations du cas d'étude.

b. Panneaux d'ombrage mixtes



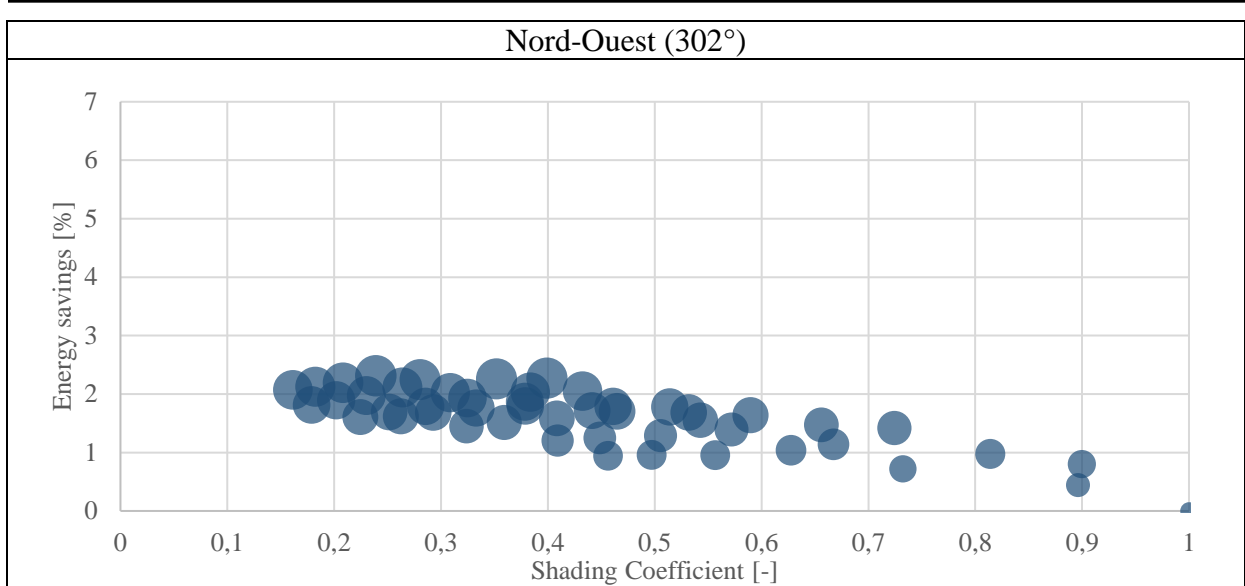
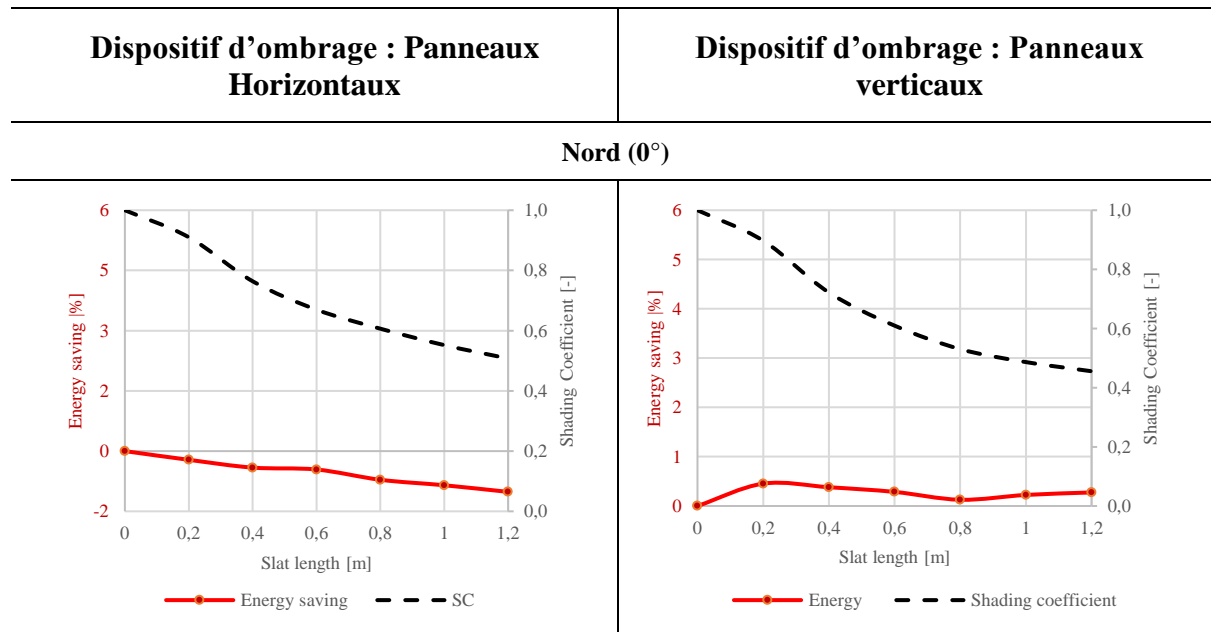


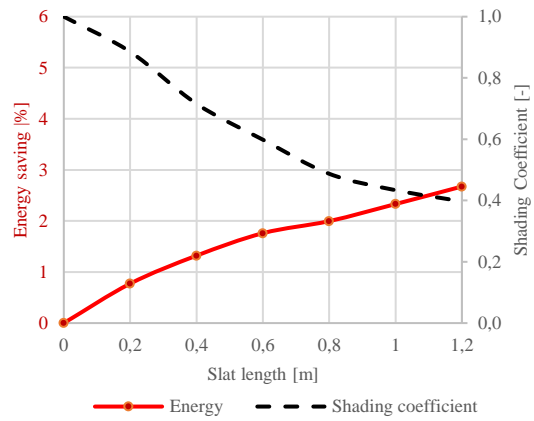
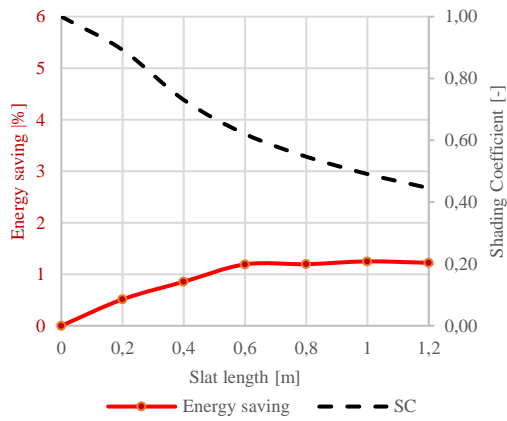
Figure VI.9. Potentiel d'économie d'énergie pour la solution d'ombrage mixte en fonction du Shading Coefficient SCm pour les orientations du cas d'étude

2. Résultats pour les orientations cardinales et semi-cardinales

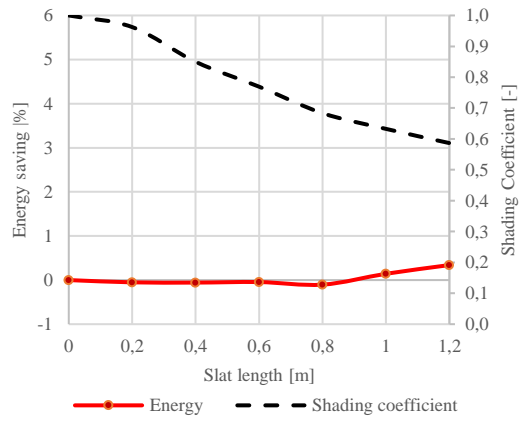
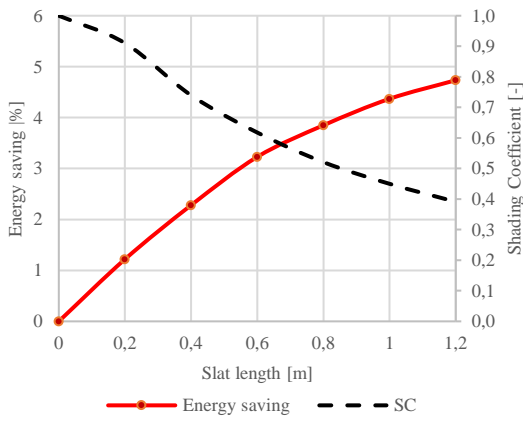
a. Effet des panneaux horizontaux et verticaux sur les parois opaques



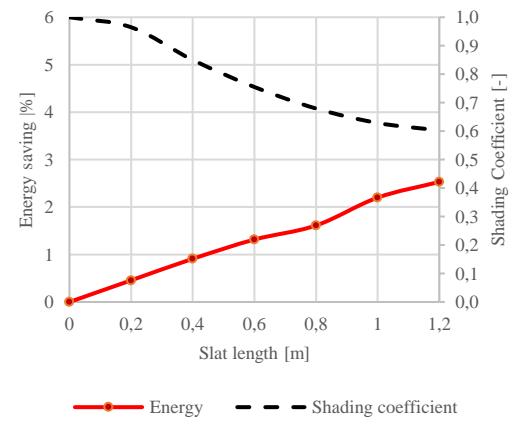
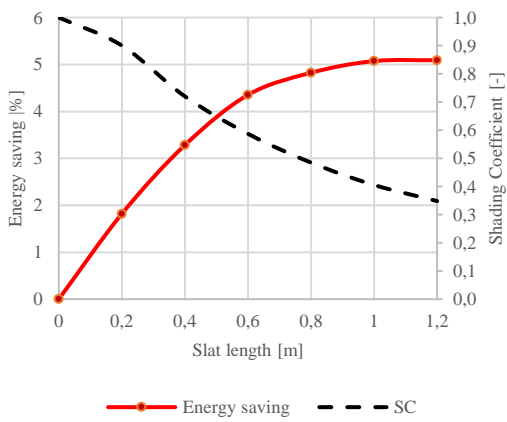
Nord-Est (45°)



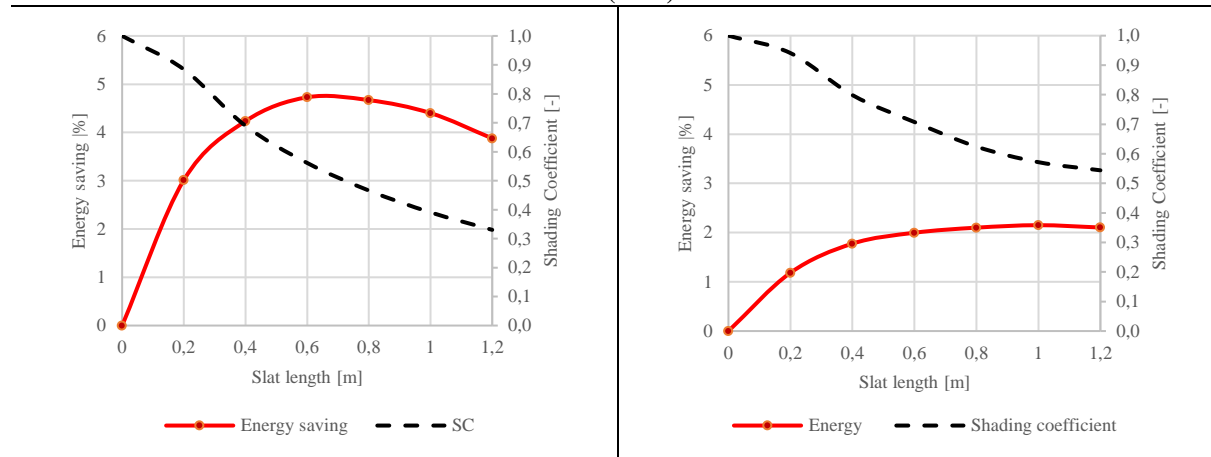
Est (90°)



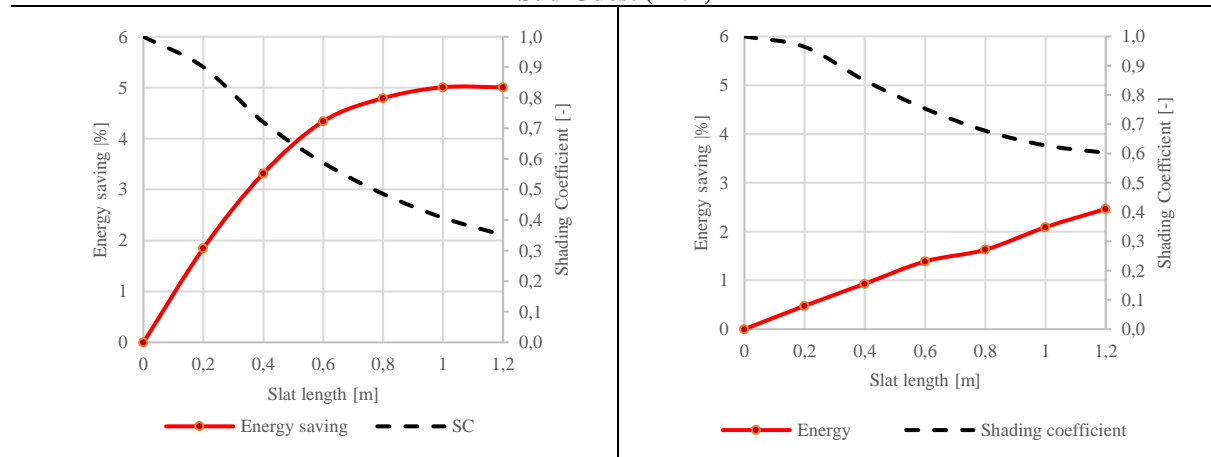
Sud-Est (135°)



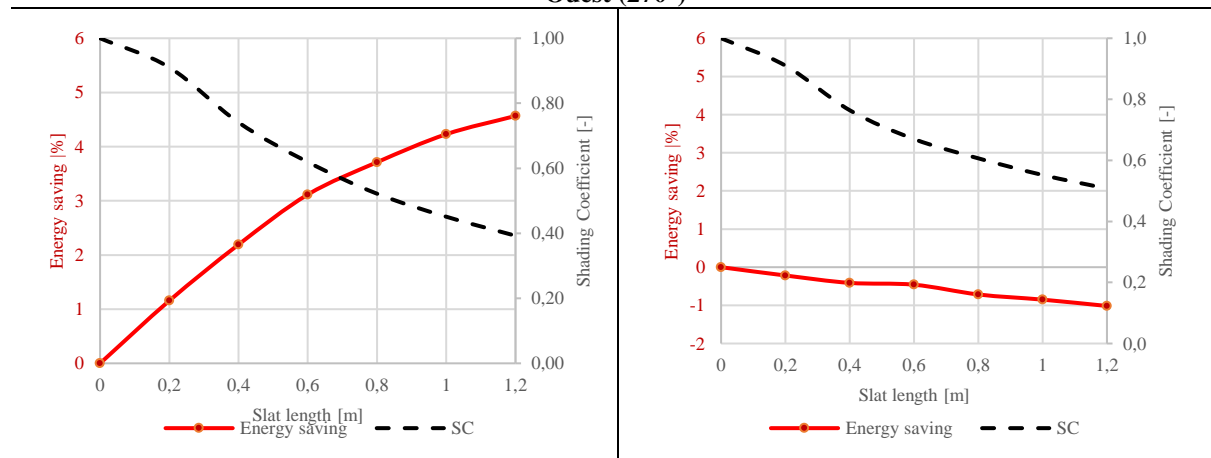
Sud (180°)



Sud-Ouest (225°)



Ouest (270°)



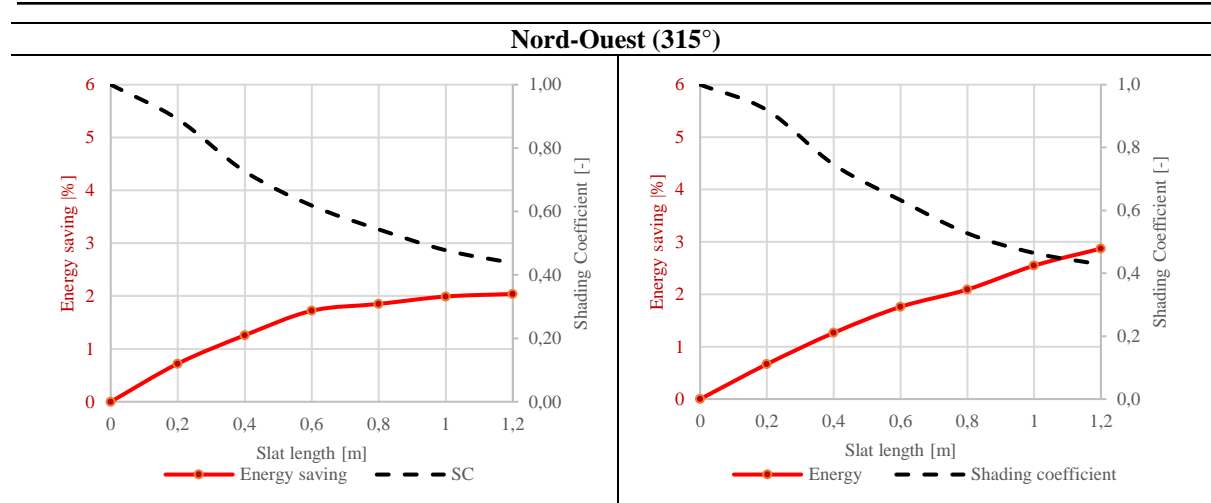
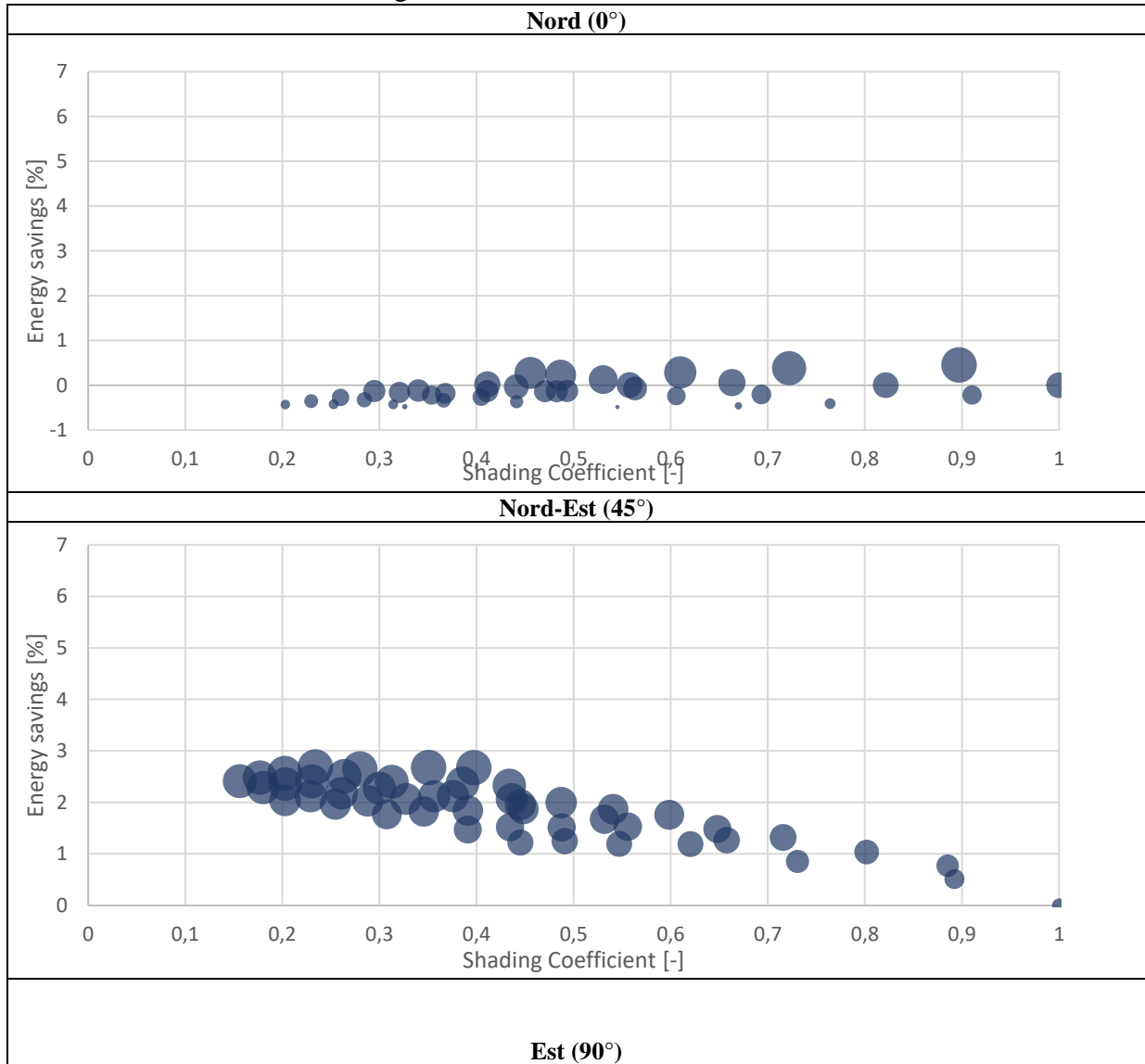
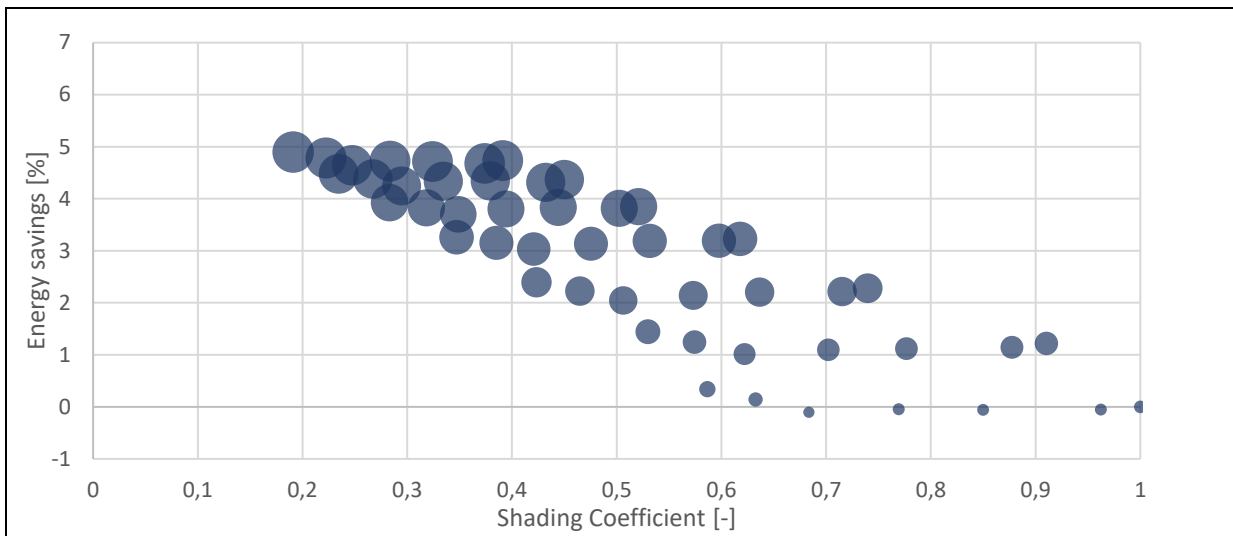


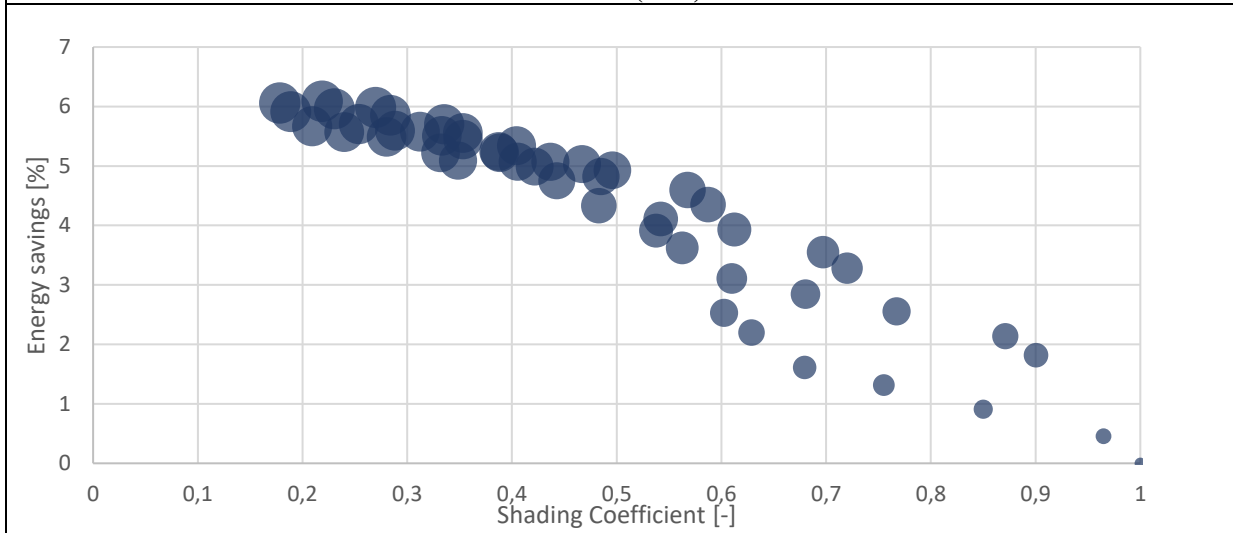
Figure VI.10. Potentiel d'économie d'énergie pour les solutions d'ombrage Horizontales et Verticales et leurs SCh et SCv relatifs en fonction de la longueur des lamelles pour les orientations considérées (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO)

a. Panneaux d'ombrage mixtes

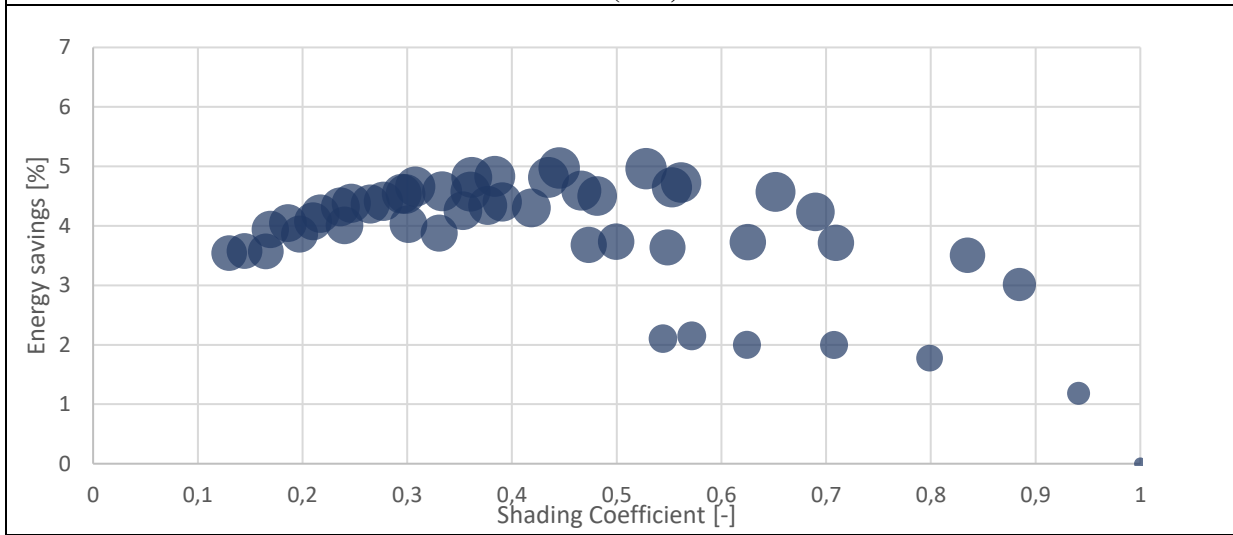




Sud-Est (135°)



Sud (180°)



Sud-Ouest (225°)

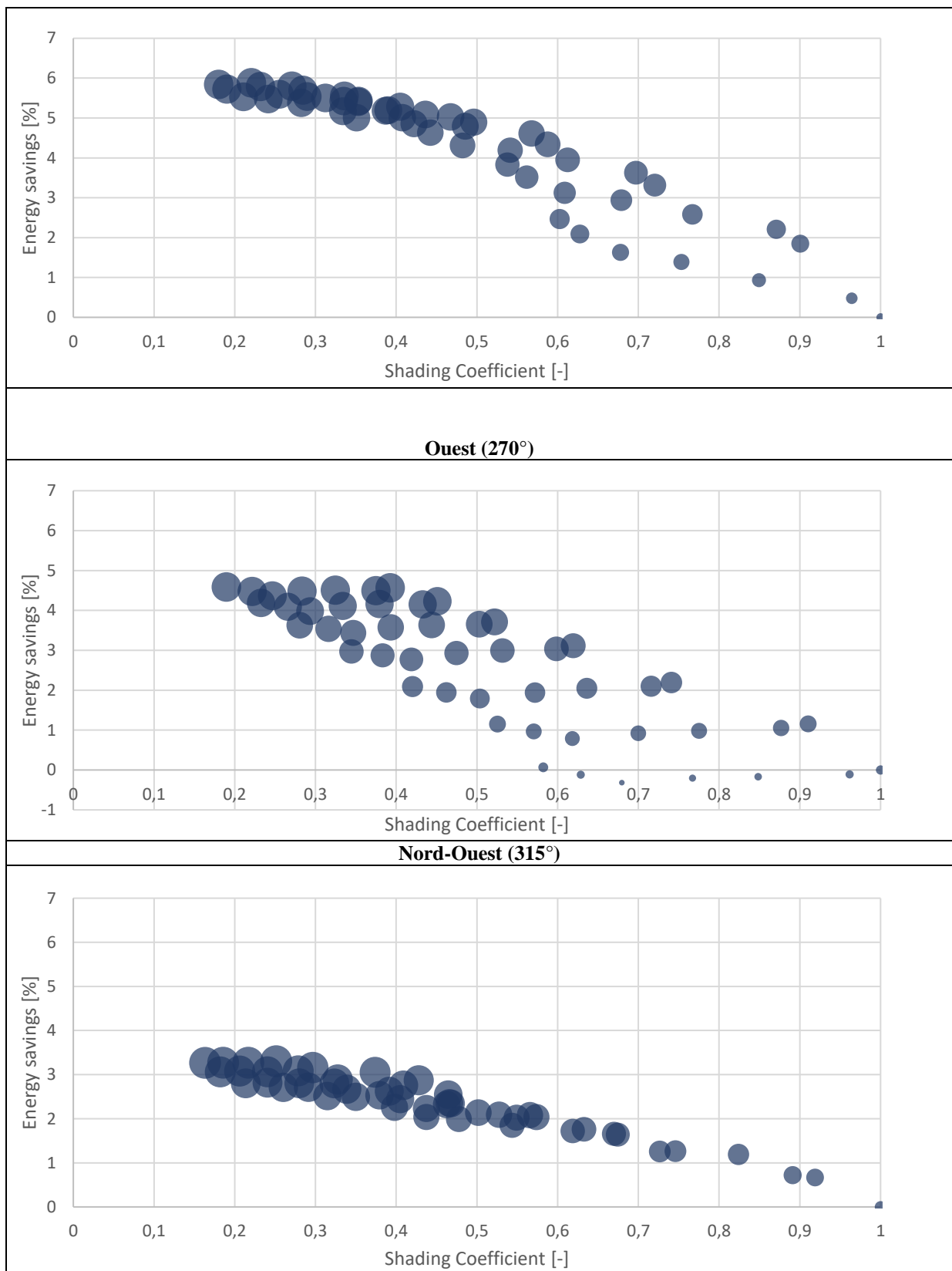


Figure VI.11. Potentiel d'économie d'énergie pour la solution d'ombrage mixte en fonction du Shading Coefficient SCm pour les orientations considérées (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO)

VI.6.1. Discussion des résultats

Les résultats de la figure VI.8 présentent à la fois le potentiel d'économie d'énergie et la mesure du coefficient d'ombrage (*shading coefficient*) (SC) obtenus à partir de l'horizontale et de la verticale sur la base de la variation de la longueur de chaque lamelle pour les orientations du cas d'étude. La figure VI.10 présente l'évolution du potentiel d'économie d'énergie en fonction du coefficient d'ombrage obtenu à partir des 49 variantes résultant de la matrice entre la variation simultanée de la longueur des lamelles verticales et horizontales.

Ces résultats présentent des similitudes proportionnelles avec les résultats pour les orientations cardinales et semi-cardinales correspondantes, respectivement rapportées dans les figures VI.10 et VI.12, avec des différences mineures. Par conséquent, dans la discussion suivante, nous généralisons l'analyse de chaque scénario d'ombrage et de son impact sur la performance énergétique du bâtiment sur la base des résultats obtenus pour les points cardinaux.

En général, nous pouvons observer à partir des résultats pour les orientations considérées que l'augmentation incrémentielle de la longueur des panneaux d'ombrage (lamelles) entraîne une diminution parabolique polynomiale du coefficient d'ombrage avec une amplitude différente pour l'horizontale (SCh) et la verticale (SCv) et la combinaison résultante (SCm) selon l'orientation. Cela peut s'expliquer par leur capacité dépendante à intercepter le rayonnement solaire et le rayonnement diffus du ciel, qui est en corrélation avec la course solaire annuelle spécifique à chaque emplacement.

En outre, le potentiel d'économie d'énergie obtenu par la diminution du coefficient d'ombrage varie d'une orientation de façade à l'autre, et cette solution peut présenter des valeurs positives et négatives en fonction de l'équilibre entre les besoins en énergie thermique (chauffage et refroidissement). Ceci est dû au rayonnement solaire global incident sur les surfaces verticales qui varie d'une orientation à l'autre, ces considérations sont développées plus en détail, sur la base des résultats rapportés ci-après :

Nord (0°):

- **Impact du SCh**

Le SCh diminue de 1 à 0,51 respectivement de la limite inférieure à la limite supérieure de la longueur des panneaux considérés. En conséquence, les résultats montrent une diminution négative des économies d'énergie, de 0 à -1,02%. Ceci est lié à la capacité des lamelles à réfléchir, même avec des valeurs négligeables, le fort rayonnement diffus du ciel, caractérisant le climat chaud et sec de Biskra, sur la surface de la façade orientée nord, augmentant ainsi progressivement les besoins de refroidissement qui sont proportionnellement plus élevés que sa diminution des besoins de chauffage.

- **Impact du SCv**

Avec la diminution du SCv de 1 à 0,46, les économies d'énergie atteignent un maximum de 0,45% à un SCv de 0,2 où l'équilibre optimal entre les besoins de chauffage et de refroidissement est atteint, puis fluctue en fonction de l'évolution inverse de ces attributs thermiques.

- **Impact du SCm**

Les résultats du graphique nuageux montrent que la diminution du SCm de 1 à 0,2 a un impact négatif sur le potentiel d'économie d'énergie pour la façade nord. Par conséquent, bien qu'une configuration prédéfinie en ce qui concerne certains réglages pour les ailettes verticales puisse présenter des économies mineures, l'adoption d'une solution d'ombrage pour une telle orientation n'est pas conseillée.

Nord-Est (45°) et Nord-Ouest (135°)

- **Impact du SCh**

Selon l'augmentation incrémentale de la longueur des lamelles de 0 à 1,2, le SCh pour les orientations nord-est et nord-ouest diminue respectivement de 1 à 0,44 et 0,45. Comme le montrent les graphiques respectifs de la figure VI.10, la diminution du SCh entraîne une augmentation des économies d'énergie de 1,25% et 2,04% pour un SCh de 0,49 et 0,44. Cette augmentation du potentiel d'économie d'énergie implique à la fois la réduction des besoins de chauffage et de refroidissement, qui est liée à la capacité des surplombs à réduire les gains de chaleur solaire et surtout de chaleur diffuse du ciel pendant les périodes estivales et à augmenter les gains solaires pendant l'hiver en suivant la course solaire annuelle.

- **Impact du SCv**

En raison de l'impact mineur du rayonnement solaire et d'un rayonnement diffus relativement plus élevé, l'adoption de ce scénario d'ombrage présente un SC plus faible, car le SCv est réduit sur des longueurs d'ailettes plus élevées à une valeur de 0,4 et 0,43. En conséquence, le potentiel d'économie d'énergie est relativement plus élevé que celui de la variante horizontale, avec des valeurs de 2,67 et 2,87 respectivement pour les orientations des façades nord-est et nord-ouest.

La différence de potentiel d'économie d'énergie entre la variante horizontale et la variante verticale est principalement due à la capacité de la variante verticale à réduire de moitié l'impact du rayonnement solaire direct incident le matin et le soir, ne permettant que des rayonnements solaires diffus mineurs.

- **Impact du SCm**

L'économie d'énergie suit un développement parabolique concave avec la diminution du SCm d'une valeur de 1 à environ 0,16 pour les deux orientations de façade. En détail, la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement est réduite en suivant une tendance concave ascendante jusqu'à atteindre un maximum d'économies d'énergie de 2,68 et 3,3% à des SCm de 0,23 et 0,25 ($h=0,6m$, $v=1,2m$) pour les deux orientations de façade.

Au-delà de ces valeurs SCm, le potentiel d'économie d'énergie diminue, car bien que la quantité de rayonnement solaire direct soit réduite, la quantité de rayonnement solaire diffus est augmentée, ce qui modifie l'équilibre de l'énergie thermique et augmente les charges de refroidissement encore plus que la réduction des besoins de chauffage.

Est (90°) et Ouest (270°)

Les deux orientations présentent des similitudes dans la performance énergétique du bâtiment et les économies d'énergie globales pour les scénarios horizontal, vertical et mixte suivent des tendances identiques avec des différences négligeables.

- **Impact du SCh**

L'économie d'énergie globale augmente suivant une tendance logarithmique en fonction de l'augmentation incrémentale de la longueur du porte-à-faux horizontal, jusqu'à atteindre une valeur maximale de 4,73% et 4,57% respectivement pour les façades orientées Est et Ouest, pour un coefficient d'ombrage de 0,39.

- **Impact du SCv**

Pour des longueurs inférieures à 0,8 pour un SCv de 0,68 et plus, nous constatons une augmentation de la consommation énergétique globale avec une très faible réduction pour le refroidissement et une augmentation proportionnelle pour le chauffage. Cependant, au-delà d'une telle valeur du SCv jusqu'à 0,59 à 1,2 m de longueur, nous pouvons percevoir une légère augmentation de l'économie d'énergie jusqu'à 0,34%, et 0,06%.

De plus, en comparaison avec la variante des porte-à-faux horizontaux, les ailettes verticales qui sont perpendiculaires au mur de façade présentent une performance relativement faible en termes de réduction de la performance énergétique globale pour les façades orientées Est et Ouest. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les radiations solaires sont presque perpendiculaires aux surfaces opaques de la façade et donc parallèles aux ailettes verticales.

- **Impact du SCm**

En raison de l'effet de corrélation entre les variantes horizontale et verticale pour ces orientations, le graphique nuageux correspondant indique que des valeurs d'économie d'énergie similaires peuvent être obtenues à partir de différents gènes horizontaux et verticaux produisant différents SCm. Néanmoins, la solution optimale est obtenue avec un SCm minimum de 0,19 (h=1,2m, v=1,2m) pour une économie d'énergie de 4,58%.

Sud-Est (135°) et Sud-Ouest (225°)

- **Impact du SCh**

Pour ces deux orientations, l'ombrage impliqué par les panneaux horizontaux (porte-à-faux) devient plus efficace. En détail, bien qu'un accroissement excessif de la longueur augmente les besoins de chauffage en franchissant le seuil requis pour un chauffage optimal en hiver, son effet sur l'atténuation du rayonnement solaire intense tout au long de la journée devient essentiel pour diminuer les charges de refroidissement omnipotentes. Cela conduit à une économie d'énergie de 5,09% et 5,01% respectivement pour les orientations considérées à la longueur de 1,2 m, ce qui équivaut à un SCh de 0,35.

- **Impact du SCv**

D'après l'analyse des résultats, la diminution progressive du SCv jusqu'à un minimum de 0,6 pour une longueur de 1,2 est également corrélée à une diminution relativement considérable de la

consommation d'énergie consacrée au refroidissement avec une augmentation mineure du chauffage pour une économie d'énergie d'environ 2,5% pour les deux orientations.

Cependant, bien que ce scénario contribue à réduire l'impact des gains de chaleur solaire pendant la matinée, et son effet multiplié avec les températures élevées du soir sur le mur, en raison des radiations solaires incidentes directes intenses caractérisant ces orientations, ce scénario n'est pas aussi performant que la variante des panneaux horizontaux. En détail, les ailettes verticales qui sont perpendiculaires au mur de façade ne fournissent pas d'ombrage efficace qui atténuerait les radiations solaires du matin et du soir tout en obstruant les radiations solaires ayant un impact excessif pendant la journée.

- **Impact du SC_m**

Les résultats présentés dans le diagramme nuageux pour les orientations Sud-Est et Sud-Ouest démontrent que plus l'ombrage fourni est élevé, plus la consommation énergétique globale est faible. Cette valeur est atteinte pour un équilibre optimal entre les besoins de chauffage et de refroidissement à un SC_m de 0,22 (h=1, v=1,2) pour des économies d'énergie de 6,09% et 5,88% respectivement pour les deux façades.

Sud (180°)

- **Impact du SCh**

Pour l'orientation sud, le potentiel d'économie d'énergie de l'application de stores horizontaux sur les murs de façade opaques suit un développement parabolique concave. Il augmente avec la diminution du SCh, correspondant à l'augmentation incrémentale de la longueur des lamelles, jusqu'à atteindre une valeur optimale de 0,56 pour 4,73% d'économies d'énergie, en accord avec la diminution significative de la consommation d'énergie dédiée au refroidissement et une augmentation relativement plus faible du chauffage.

- **Impact du SC_v**

Les ailettes verticales atteignent un potentiel d'économie d'énergie plus faible de 2,15 avec un SC_v de 0,57 (1m de longueur), et parallèlement un SC_v plus faible car elles bloquent jusqu'à 54% des radiations solaires globales (SC_v=0,54) tout au long de l'année.

- **Impact du SCm**

De manière similaire, l'économie d'énergie suit une tendance concave en fonction de la diminution du SCm. La solution optimale est atteinte à une valeur de coefficient d'ombrage de 0.44 ($h=0.6m$, $v=0.4m$) avec un potentiel d'économie d'énergie de 4.97%.

VI.6.2. Résumé des solutions optimales, vers une analyse comparative des solutions optimales d'ombrage

Nous pouvons conclure, sur la base des valeurs optimales rapportées dans la figure VI.12, que l'adoption d'une solution d'ombrage pour les surfaces opaques de la façade présente une influence positive sur la réduction des gains de chaleur solaire et donc sur la réduction de la charge de refroidissement, considérée comme la composante omnipotente, et donc sur la réduction de la consommation énergétique globale. L'amplitude de l'économie d'énergie varie d'un scénario à l'autre, en fonction de ses attributs dans l'atténuation de la direction du rayonnement solaire correspondant à la course solaire de l'emplacement spécifié.

Pour le climat chaud et sec de Biskra, en considérant les conditions limites et les paramètres de fonctionnement de notre pièce de référence, l'ombrage fourni par les surplombs horizontaux basés sur la configuration présentée donne de meilleurs résultats que les ailettes verticales sur les orientations de façade E, SE, S, SO, O et affecte négativement l'orientation Nord. Quant aux orientations N, NE et NO, les ailerons verticaux présentent de meilleurs résultats.

Leur agrégation comble le vide de chaque variante et, comme indiqué, surpasse les surplombs horizontaux avec un potentiel d'économie d'énergie encore plus élevé pour les orientations sub-cardinales.

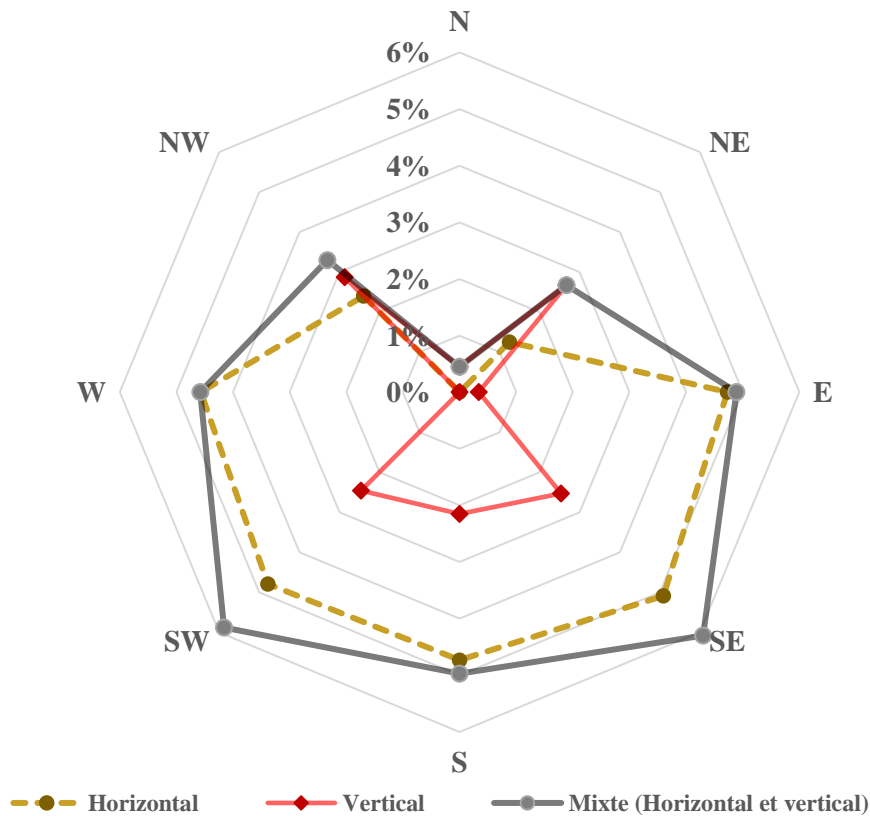


Figure VI.12. Potentiel d'économie d'énergie selon les solutions d'ombrage optimale horizontales, verticales et mixtes pour les orientations considérées (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO)

Les détails graphiques de la valeur optimale en termes d'économies d'énergie sont présentés à l'ANNEXE B, qui décrit les résultats du calcul du rayonnement solaire de la cellule test pour chaque orientation avec leur configuration d'ombrage optimale respective.

VI.7 Conclusion

Ce dernier chapitre a décrit les étapes de l'étude paramétrique portant sur l'évaluation des propriétés thermo-physiques et dynamiques de la paroi opaque de la façade et l'optimisation de ses performances énergétiques. L'estimation du potentiel d'économie d'énergie pouvant être obtenu en atténuant le rayonnement solaire incident par une solution d'ombrage, a également été examinée. Ainsi, l'évaluation a consisté en deux parties distinctes basées sur des approches différentes.

La première vise à évaluer l'influence de la variation de l'épaisseur du polystyrène expansé comme solution d'isolation sur trois murs ayant une transmission thermique initiale identique et différents paramètres de performance d'inertie thermique et 4 coefficients d'absorption solaire.

Il a été conclu que, pour le régime intermittent du bâtiment de bureaux étudié, la transmission thermique impliquée par la stratification du mur et l'absorption solaire du revêtement définissant sa couleur et sa texture sont les paramètres qui influencent le plus la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement et peuvent être améliorés par la définition adéquate de la masse thermique du mur. En fait, la configuration d'un mur mi-lourd avec un revêtement lisse de couleur claire représente la solution constructive optimale pour le climat chaud et sec de Biskra, car elle est plus performante que les murs légers, et toute augmentation supplémentaire de la masse thermique est préjudiciable car elle affecte négativement les performances thermiques du bâtiment en raison des attributs climatiques spécifiques de ce contexte.

De plus, du point de vue de l'énergie opérationnelle, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant réduit proportionnellement la consommation d'énergie ; une solution efficace est atteinte à 7,5cm, au-delà de laquelle l'échange pour des épaisseurs plus élevées devient négligeable. Cependant, si l'on considère l'énergie primaire globale, la solution optimale est réduite à 6 cm en raison de l'énergie intrinsèque impliquée par l'isolant.

La deuxième approche concerne l'évaluation du potentiel d'économie d'énergie lié à l'application de solutions d'ombrage sur les surfaces opaques de la façade. La méthode adoptée, issue d'une approche validée et réaliste, consiste à utiliser des surplombs horizontaux et des ailettes verticales perpendiculaires au mur de façade et à supposer une utilisation simultanée de ces deux dispositifs. L'objectif est d'établir une corrélation entre le coefficient d'ombrage résultant et la réduction de la consommation énergétique globale en termes de chauffage et de refroidissement. À cet effet, les simulations énergétiques, réalisées sur une cellule test préconfigurée, ont été effectuées pour les orientations cardinales, semi-cardinales et relatives au cas d'étude " bâtiment ADE ".

Les résultats ont démontré que, dans le cas des conditions limites et des paramètres de fonctionnement d'un tel bâtiment de bureaux dans le climat chaud et sec de Biskra, les solutions d'ombrage représentent une alternative prometteuse en vue de réduire la consommation énergétique globale. Un potentiel d'économie allant jusqu'à 6,1%, était possible selon l'orientation, à l'exclusion des façades orientées Nord, où son application devient préjudiciable. En outre, il faut préciser que des coefficients d'ombrage similaires peuvent être obtenus à partir de différentes configurations ; cependant, les performances diffèrent également d'un scénario à l'autre. Plus précisément, l'ombrage obtenu à partir des surplombs horizontaux surpasse l'ombrage vertical dans

presque tous les scénarios, mais un scénario mixte comble les lacunes et augmente le potentiel d'économie d'énergie pour chaque orientation considérée.

Enfin, nous pouvons conclure de l'évaluation de l'impact des aspects formels et constructifs des surfaces de façades opaques, que sa performance thermique et donc la performance énergétique du bâtiment de bureaux peuvent être fortement influencées par l'adéquation entre la transmittance thermique du mur extérieur, l'inertie thermique et la couleur de son revêtement extérieur. En outre, en tant que solution complémentaire pour atténuer le rayonnement solaire incident, la mise en œuvre de solutions d'ombrage peut réduire les besoins globaux en énergie thermique, et peut être présentée comme une stratégie potentielle pour améliorer la performance des façades dans les nouvelles constructions et les bâtiments rénovés.

C Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

1. Principaux résultats et synthèses

La présente recherche a été menée afin de comprendre et d'évaluer l'impact des aspects formels et des composants constructifs de la façade d'un bâtiment de bureaux, et d'examiner jusqu'à quel point les choix matériels permettraient de rationaliser et de libérer les décisions architecturales formelles dans la perspective d'une approche d'adaptabilité climatique et d'efficacité énergétique sous les conditions climatiques chaudes et arides du sud de l'Algérie. De ce point de vue, le travail de recherche a été fondé sur l'assertion selon laquelle l'adoption de mesures constructives et formelles adéquates relatives à la configuration des composants de la façade, en ce qui concerne leur adaptation à la région chaude et sèche en Algérie, devrait permettre d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment dans sa globalité. Implicitement, cela suppose que le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment, et précisément de ses parois verticales extérieures (façades), doit être évalué en fonction de l'interconnexion qui s'établit entre d'une part, les propriétés thermo-physiques et dynamiques de ses murs (parties opaques), et d'autre part, les propriétés optiques et thermiques de ses fenêtres (parties vitrées). De plus, l'optimisation multi-objective de la performance thermique des parois verticales extérieures peut réduire considérablement la demande en énergie finale et primaire du bâtiment, et donc, limiter ses impacts environnementaux.

Ainsi, le principal objectif de cette recherche est d'arriver à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments à usage de bureaux relativement à un contexte climatique chaud et sec,

en agissant sur les composants vitrés et opaques de la façade et, notamment, les paramètres caractérisant ses aspects formels et constructif-matériel. De ce fait, l'étude a porté sur l'évaluation et, ensuite, l'optimisation des spécificités constructives et des mesures conceptuelles d'appoint mises en œuvre dans les différentes parties opaques et vitrées de la façade. La ville de Biskra a été choisie pour servir de contexte d'étude, son climat étant représentatif des conditions chaudes et arides, en outre, elle regroupe un grand nombre de bâtiments de bureaux sièges des différentes directions et administrations présentant une diversité de typologies architecturales et de traitement de façades.

Concrètement, le travail pratique a porté sur l'évaluation de l'impact de la transmission thermique et de l'inertie thermique des surfaces opaques de la façade, des paramètres physiques des surfaces vitrées et du rôle des stratégies de protections solaires dans la modulation des attributs extrêmes du climat chaud et sec. L'objectif visé était d'arriver à établir une connaissance spécifique sur le potentiel de ces différents paramètres matériels et formels dans la réduction des besoins énergétiques des bâtiments à usage de bureau, tout en fournissant un environnement de travail confortable compte tenu du régime d'exploitation intermittent les caractérisant.

À cette fin, le présent manuscrit a été divisé en deux parties complémentaires ; la première partie a porté sur le développement d'un cadre conceptuel par l'établissement d'un sous-bassement théorique fondamental dans lequel les concepts et les notions de base liés à l'hypothèse ciblée sont abordés pour mener à bien le processus d'investigation. La deuxième partie est analytique explicative, et a été consacrée à l'investigation des attributs pertinents à l'objet d'étude selon une étude expérimentale portant sur l'évaluation de l'interconnexion entre les variables définies sur la base d'un cadre méthodologique préalable. Le manuscrit dans son ensemble comporte six chapitres.

Le premier chapitre fournit une compréhension générale de l'efficacité énergétique des bâtiments et une rétrospective des réglementations et politiques appliquées par le gouvernement algérien dans le secteur du bâtiment, en soulignant ses implications importantes sur les changements climatiques et la sécurité énergétique. En raison de ses attributs complexes, l'efficacité énergétique des bâtiments neufs ou rénovés nécessite non seulement une connaissance spécifique du comportement énergétique du parc immobilier, mais elle repose également sur des codes et des normes de construction spécifiques à chaque zone. Son implication peut être traitée

par l'adoption de stratégies actives et passives au cours du processus de conception et par la réglementation du fonctionnement des bâtiments et du comportement des utilisateurs dans la phase opérationnelle du bâtiment.

Dans cette perspective, l'Algérie a récemment publié un plan d'efficacité énergétique avec des indications implicites pour les bâtiments comprenant des solutions techniques basées sur les réglementations thermiques fournies par les DTR 3-2 et DTR 3-4 auxquelles se sont ajoutées des campagnes de sensibilisation pour faire face à l'augmentation de la consommation d'énergie primaire et des émissions de GES. Toutefois, ces directives peuvent être améliorées par des lignes directrices décisives prenant en considération le type de bâtiment, car les performances de ces derniers varient en fonction du contexte. En fait, les bâtiments de bureaux nécessitent des connaissances spécifiques car ils sont principalement affectés par le CVC, l'éclairage artificiel et les charges des équipements, ainsi que par une occupation intermittente des utilisateurs.

Le deuxième chapitre présente une vue d'ensemble des pratiques constructives des façades des bâtiments en mettant l'accent sur les facteurs affectant l'énergie et les stratégies de conception assurant leur adaptabilité au climat chaud et sec. En effet, ce climat caractérisé par de étés longs et torrides, des hivers secs et froids et des vents de sable saisonniers, couvre quatre-vingt-neuf pour cent du territoire algérien. Pour répondre à de telles conditions, la conception des façades des bâtiments de bureaux doit impliquer des stratégies actives et passives capables de maintenir un environnement confortable pour l'utilisateur. Ces stratégies doivent être guidées par le choix adéquat des matériaux et l'adoption de mesures de protection solaire en prédéfinissant l'orientation, la fenestration et les systèmes d'ombrage.

A ce titre, le troisième chapitre s'attarde sur les paramètres matériels des éléments de la façade, notamment, ses éléments opaques, vitrés et d'ombrage. Ainsi, les propriétés thermo-physiques et dynamiques des parois opaques sont explorées, alors qu'un aperçu des différentes solutions d'isolation est présenté. Le chapitre s'intéresse, également, aux méthodes de définition de l'inertie thermique des parois, de même qu'à l'influence de la texture de la surface et des propriétés des surfaces vitrées sur le fonctionnement thermique de la façade. Enfin, les solutions d'ombrage pour les surfaces vitrées et opaques sont étudiées.

Considérant que la paroi opaque extérieure est définie par sa transmittance thermique, son inertie thermique et les propriétés de sa surface externe, tous ces paramètres déterminent son comportement thermique. Les surfaces vitrées, qu'elles soient ouvertes pour assurer une ventilation naturelle adéquate ou fermées, sont à considérer selon leur aspect formel, donc leurs dimensions, et en tenant compte de la surface d'ouverture par rapport au mur (WWR) ; ces aspects physiques sont déterminants pour les propriétés thermiques et visuelles du système de fenestration. En outre, compte tenu des exigences impliquées dans la conception des dispositifs d'ombrage ces éléments doivent recevoir des configurations appropriées afin de fournir des environnements visuels et thermiques confortables sur le lieu de travail.

En explorant la littérature relative au comportement thermo-physique des éléments clés définissant la façade, un approfondissement théorique et conceptuel a porté sur le mode d'échange thermique statique et le comportement transitoire des matériaux a été examiné. De cette étude, il est apparu que la transmission thermique de la paroi opaque est définie par sa stratification, et peut être améliorée par l'épaisseur de l'isolation thermique. Cette dernière peut être de source conventionnelle comme le polystyrène expansé, de pointe ou de haute performance pour l'exemple de l'aérogel. Ces derniers se définissent par leurs performances, principalement thermiques pertinentes pour la réduction des déperditions thermiques en phase d'exploitation du bâtiment, et environnementales concrétisées par leur énergie grise et leur carbone. En outre, en plus de leurs paramètres thermo-physiques, les murs sont définis par leur performance dynamique. Cette dernière est quantifiée par la méthode de l'admittance afin de déterminer son facteur de décrémentation et son décalage temporel (déphasage).

En outre, les surfaces vitrées composées de la stratification et du revêtement du verre, de son cadre et de leurs composants d'ombrage intégrés ou séparés peuvent être optimisées en fonction du type de bâtiment et de son utilisation. Leur performance thermique est souvent évaluée par une transmission thermique généralisée entre le vitrage et le cadre de la fenêtre, et leur performance peut être mesurée par différentes mesures telles que l'intensité de la lumière du jour utile et le facteur de lumière du jour. Ses performances thermiques et visuelles ne peuvent pas être controversées, bien que les dispositifs de protection solaire puissent atténuer la sensation d'éblouissement des utilisateurs et limiter la quantité de radiations solaires incidentes, le choix d'un type de vitrage adéquat est un paramètre clé pour réduire la consommation d'énergie du bâtiment.

Par conséquent, la conception de façades de bâtiments dans un climat chaud et sec implique la prise en compte d'un seuil adéquat de radiations solaires incidentes par le biais de systèmes d'ombrage ou de stratégies d'auto-ombrage ; cela implique également une configuration adéquate de ses surfaces opaques et vitrées conséquemment et doit être considérée spécifiquement en tenant compte du type de bâtiment, de son environnement immédiat et de sa localisation.

La deuxième partie de la thèse était de facture analytique. De fait un cadre méthodologique a été élaboré, présentant le contexte de l'étude et le cas d'étude, décrivant les techniques d'investigation et les outils préalables nécessaires à la recherche. Dans cette partie l'impact des composants (surfaces opaques et vitrées et solutions d'ombrage) de la façade sur l'efficacité énergétique du bâtiment a été évalué grâce à une étude paramétrique par simulation. Les résultats obtenus à travers l'interface paramétrique de Grasshopper/Rhinoceros assistée des plugins environnementaux de Ladybug&honeybee et fournis par EnergyPlus, sont rapportés et discutés ci-après.

Ainsi, le quatrième chapitre définit la ville de Biskra comme contexte d'étude, et présente une analyse ciblée de son climat, caractérisant les attributs du climat chaud et sec. Dans une deuxième phase, un diagnostic qualitatif et quantitatif des données collectées limité à un échantillon de 10 bâtiments de bureaux réalisés au cours des deux dernières décennies a été traité avec un intérêt particulier pour les solutions techniques appliquées dans la conception des façades et aussi pour l'aspect de l'utilisation de l'énergie du bâtiment comme processus principal. L'étude a révélé que les pratiques constructives de ces immeubles de bureaux négligent la plupart du temps les stratégies de conception décrites en fonction du climat. Ils sont caractérisés par des implantations subjectives qui ne tiennent pas compte de l'orientation optimale, avec des rapports surface/volume élevés, augmentant ainsi les surfaces exposées de l'enveloppe. Bien que le WWR moyen des bâtiments puisse être présenté comme adéquat, les orientations spécifiques au ratio d'ouverture ne s'adaptent pas aux conditions extrêmes du climat, en particulier les ouvertures spécifiques des espaces de bureaux qui sont controversées sans aucune solution d'ombrage adéquate. Couplé à un simple vitrage, ou dans de très nombreux cas à un double vitrage non performant, le problème de surchauffe est présenté à son paroxysme, ce qui affecte surtout les besoins de refroidissement importants dans ce contexte. Ces grandes lignes ont justifié le choix du cas d'étude.

Le bâtiment de bureaux "Algérienne des eaux", en tant que cas représentatif des pratiques constructives récentes à Biskra, a été soumis à une analyse quantitative approfondie afin de servir

de banc d'essai pour le processus d'évaluation et d'optimisation des façades. À cet effet, un calibrage du "modèle énergétique de l'ensemble du bâtiment" a été établi sur la base d'une collecte de données, de fichiers de données météorologiques adaptés, d'un modèle théorique validé pour le système CVC appliqué, et de mesures et enquêtes sur site. Le modèle validé a permis de développer des sous-modèles calibrés de référence et de cellule test, isolant ainsi leur performance énergétique des surfaces de la façade du bâtiment, une étape pertinente pour la portée des méthodologies d'optimisation adoptées.

Le cinquième chapitre est consacré à l'évaluation de l'impact et à l'optimisation globale des propriétés des surfaces vitrées, en termes de paramètres thermiques et optiques (U_g , SHGC et V_t), et de la surface d'ouverture par rapport à la surface du mur de façade (WWR) sur l'efficacité énergétique du modèle de la " cellule test ", en supposant les deux scénarios sans ombrage et avec des stores extérieurs mobiles. De plus, les orientations spécifiques des façades du cas d'étude ainsi que les points cardinaux et secondaires ont été pris en compte dans l'analyse. L'évaluation énergétique a pris en compte la consommation d'énergie globale de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel par rapport aux paramètres de confort visuel du lieu de travail (éclairage et exigences en matière de DGI), et a été réalisée sur Ladybug&Honeybee alimenté par EnergyPlus. En ce qui concerne l'indice d'éclairage global, un algorithme de contrôle a été défini pour une gradation de l'éclairage artificiel et des stores extérieurs dynamiques ont été pris en compte dans le processus de simulation, car il a été prouvé que l'ombrage extérieur est un bon facteur de réduction de la sensation d'éblouissement.

Les résultats de la simulation énergétique paramétrique ont fourni des lignes directrices afin de garantir un niveau d'éclairage approprié, d'atténuer l'effet d'éblouissement et de réduire la consommation énergétique globale. Pour les immeubles de bureaux dans le climat chaud et sec de Biskra, bien que l'amélioration des valeurs U_g des fenêtres réduise la consommation d'énergie dédiée au chauffage et au refroidissement, le LSG est le facteur qui a le plus d'impact, et donc un faible SHGC réduit le refroidissement et augmente le chauffage, un faible V_t augmente. De plus, étant le facteur ayant le plus d'impact sur l'énergie, le rapport global optimal du WWR est de 15%; tandis qu'un rapport de 30% est favorable pour les façades orientées Nord et Nord-Est, au-delà de ces valeurs, et en fonction du type de fenêtre, il est essentiel de fournir un système d'ombrage où la protection contre les gains de chaleur liés au soleil diffus devient plus importante.

Du point de vue des économies d'énergie, la prise en compte des stores extérieurs mobiles présente des économies d'énergie significatives, même pour le WWR optimal, d'environ 3% pour les fenêtres à double vitrage haute performance avec un LSG relativement élevé, et de 12 à 17% pour une fenêtre à simple vitrage à couche transparente. D'un point de vue énergétique, et indépendamment du WWR, la fenêtre à double vitrage haute performance avec contrôle solaire est la plus efficace sur le plan énergétique et le LSG est le facteur qui a le plus d'impact sur la consommation énergétique globale, et un U_g approprié avec un LSG est nécessaire dans un tel climat caractérisé par des radiations solaires intenses tout au long de l'année.

Le sixième et dernier chapitre est divisé en deux parties distinctes, toutes deux optimisant la configuration de la paroi opaque sur les besoins en énergie thermique des bâtiments. La première partie est basée sur une méthode nouvelle et validée qui évalue l'impact opérationnel et l'énergie des propriétés thermo-physiques et dynamiques impliquées par le cycle de vie de la stratification de la paroi. La méthode adoptée suggère trois configurations de murs à transmittance thermique égale, représentant des murs légers, mi-lourds et lourds définis par leur comportement thermique dynamique. Par la suite, une isolation thermique adéquate a été supposée être une solution externe appliquée avec une plage prédéfinie et un pas incrémentiel qui fait varier la transmission thermique du mur avec des effets mineurs sur les paramètres de performance de son inertie thermique. En outre, une gamme représentative pour le coefficient d'absorption solaire qui généralise la variation de la couleur du mur extérieur.

La consommation d'énergie de refroidissement et de chauffage du bâtiment est ensuite évaluée sur la base du fichier de données météorologiques TMY. L'analyse des résultats montre que les facteurs les plus influents sont le coefficient de transmission thermique parallèlement au coefficient d'absorption solaire, et en termes d'énergie opérationnelle, les valeurs les plus basses impliquées par des niveaux d'isolation plus élevés donnent les meilleurs résultats. En outre, il est conseillé de concevoir les façades des bâtiments avec des matériaux de couleur claire. Par ailleurs, bien que l'inertie thermique n'implique pas de grandes économies d'énergie, il est intéressant de considérer un mur moyennement lourd dans le processus de conception car il présente de meilleurs résultats. Cependant, en ce qui concerne l'énergie impliquée par l'épaisseur de la solution d'isolation considérée, des valeurs inférieures d'isolation sont à prévoir, car pour une durée de vie de 30 ans, l'isolation est présentée avec une valeur optimale de 5.5 cm au lieu de 7,5 cm.

Dans la deuxième partie, le concept d'auto-ombrage sur la paroi opaque est abordé par la mise en œuvre de dispositifs d'ombrage afin d'évaluer son potentiel d'économie d'énergie. À cet effet, des lamelles paramétrées verticales et horizontales ont été supposées sur le mur de la façade opaque du bâtiment. Les résultats ont démontré que l'atténuation du rayonnement solaire direct et diffus est la solution la plus économe en énergie pour toutes les orientations avec des réductions jusqu'à 6.1% de la consommation d'énergie, mis à part la façade Nord, où la surprotection des parois implique une augmentation proportionnelle des besoins en énergie pour le chauffage, ce qui affecte négativement la balance d'énergie.

Comme le suggèrent les solutions potentielles, l'interconnexion entre les composants opaques et vitrés de la façade peut améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment. Un choix adéquat de la configuration de chaque solution passive intégrée, comme le niveau d'isolation thermique, la stratification des murs, le type de vitrage et les systèmes d'ombrage, permet non seulement d'offrir un lieu de travail confortable mais aussi de réduire considérablement la consommation énergétique globale. Les méthodes adoptées dans cette recherche ont permis de résoudre des problèmes complexes et de fournir des orientations stratégiques pour la conception énergétique des bâtiments de bureaux neufs et en voie de rénovation.

2. Recommandations

Les résultats obtenus fournissent des lignes directrices constructives détaillées concernant les différentes applications et configurations possibles pour la façade des immeubles de bureaux, et les moyens pour introduire des solutions d'ombrage dans le processus de conception dans un climat chaud et sec.

Par conséquent, les recommandations suivantes peuvent être adoptées dans les phases de conception des nouvelles constructions et des actions de rénovation des bâtiments pour chacun des composants opaques et vitrés de la façade :

2.1. Recommandations pour les surfaces vitrées :

- La valeur optimale du WWR se situe dans une plage de 15 % à 45 %, selon l'orientation de la façade en fonction de l'espace de travail.

- Une orientation appropriée des surfaces vitrées de la façade vers : Nord, Sud, Nord-Est et Nord-Ouest dans l'ordre est bien conseillée et doit être considérée dans l'orientation du bâtiment et la distribution des espaces.
- Une façade Nord, Nord-Est et Nord-Ouest peut même exclure les dispositifs d'ombrage à un taux de WWR de 30% et moins, avec des différences mineures pour un taux de WWR de 45%.
- Les façades orientées à l'est, au sud-est, au sud, au sud-ouest et à l'ouest sont plus efficaces en termes de consommation d'énergie globale pour un rapport WWR de 15% avec un système de protection solaire adéquat.
- Le choix du type de verre de la fenêtre dépend d'abord du rapport LSG, en tenant compte de la valeur U combinée du verre et du cadre.
- En fonction des paramètres physiques de la fenêtre, une solution appropriée est la sélection d'un double vitrage équipé de caractéristiques de contrôle solaire, telles qu'une couche ou un sous-produit dans la composition du verre, qui sont presque aussi performants que lorsqu'ils sont équipés de systèmes de protection solaire adéquats, avec des différences négligeables. Ce type de vitrage, en plus de rejeter le rayonnement solaire et donc de minimiser les gains de chaleur solaire, permet d'obtenir des espaces de travail lumineux avec un contrôle suffisant de l'éblouissement.
- En général, le vitrage à haute performance devrait être le choix de prédilection dans la conception des nouvelles constructions et dans la rénovation des bâtiments de bureaux, car les options de vitrage simple ne conviennent tout simplement pas.
- Un dispositif d'ombrage contrôlé et adéquat, associé à un système de régulation de la lumière artificielle pour l'espace de travail, garantit un espace de travail visuellement et thermiquement confortable avec une amélioration importante de l'efficacité énergétique du bâtiment. Par conséquent, ces dispositifs sont bien conseillés pour chaque type de fenêtre et permettraient l'adoption d'un WWR plus élevé.

2.2. Recommandations pour les murs de façade opaques :

- Du point de vue de la phase opérationnelle, la solution la plus performante sur le plan énergétique pour les immeubles de bureaux dans un climat chaud et sec sont des murs mi-

lourds avec un facteur de décrémentation de 0,143, un déphasage de 12h et une épaisseur d'isolation de 7,5 cm, ce qui équivaut à une transmission thermique de 0,35 W/m²K.

- Du point de vue du cycle de vie, il est conseillé d'adopter une épaisseur d'isolation de 5,5 cm pour un paramètre d'inertie thermique des murs de $D_f = 0,155$ et un déphasage de 11,8h, ce qui équivaut à une valeur U de 0,43 W/m²K.
- Il convient toujours, pour toutes les orientations mis à part pour les surfaces orientés Nord dans le cas d'un climat chaud et sec, de minimiser l'impact des apports solaires sur les parois opaques, et un coefficient d'ombrage de 0.4, 0.19, 0.22, 0.44, 0.18, 0.19 et 0.25 doit être considéré pour les façades NE, E, SE, S, SO, O et NO respectivement.

3. Limites de la recherche

Cette recherche a mis en pratique des méthodes appropriées pour évaluer et définir des solutions optimales en termes de performances énergétiques des bâtiments de bureaux pour la conception des surfaces opaques et vitrées de la façade en tenant compte de l'effet sur les solutions d'ombrage mises en œuvre dans le cas d'un climat chaud et sec.

Cependant, il est toujours utile de mettre l'accent sur les paramètres dont dépend la définition de la configuration optimale de la façade du bâtiment, tels que :

- La taille du bâtiment,
- l'emplacement spécifique du bâtiment,
- l'environnement immédiat,
- les paramètres opératoires et le comportement des utilisateurs,
- les performances thermiques des surfaces opaques et l'énergie intrinsèque de ses éléments constitutifs,
- les performances thermiques et optiques des surfaces vitrées
- et les solutions d'ombrage.

Il convient donc de tenir compte de la corrélation entre ces divers paramètres propres à la façade pour mieux appréhender la conception énergétique des bâtiments. Dans tous les cas e figures, et bien que la présente étude ait généré des résultats utiles, il convient de mentionner un certain nombre de limites, à savoir :

- Le modèle énergétique est basé sur un bâtiment représentatif du contexte de l'étude qu'est la ville de Biskra, et a été supposé être un bâtiment isolé afin de permettre une évaluation objective de l'impact de chaque paramètre considéré. Par conséquent, aucune obstruction de l'environnement n'est impliquée.
- L'évaluation et l'optimisation de la performance énergétique des surfaces vitrées sont effectuées sur un modèle de test-cell adapté où seule la façade principale est exposée. L'extension de cette considération à plus de surfaces exposées donnerait des résultats différents.
- 5 valeurs prédéfinies de WWR et 5 types de fenêtres ont été considérés.
- Le système d'ombrage amovible est horizontal pour chaque orientation adoptée. Bien qu'il maintienne avec succès un seuil prédéfini de rayonnement solaire incident, la prise en compte d'ombrages verticaux en fonction de l'orientation conduirait à des résultats légèrement différents.
- L'évaluation et l'optimisation des éléments opaques sont basées sur une méthode ciblée spécifiquement pour le mur de façade, sans tenir compte de l'impact du toit et du plancher inférieur (RDC). De plus, elle adopte une orientation spécifique basée sur celle de cas d'étude.
- Les différents murs considérés dans l'étude sont "léger, mi-lourd et massif" avec des paramètres de performance d'inertie thermique bien définis. Ces valeurs dépendent des stratifications, et des résultats légèrement différents peuvent être obtenus par d'autres variations.
- La solution d'isolation adoptée est le polystyrène expansé, les propriétés thermo-physiques adoptées sont basées sur les valeurs moyennes du DTR, et une énergie grise moyenne issue de la littérature. L'adoption de différents matériaux d'isolation thermique permettra d'obtenir des valeurs de consommation d'énergie primaire différentes.
- L'approche de l'auto-ombrage (self-shading) des murs opaques considère des lamelles horizontales et verticales avec des angles fixes sur un mur totalement opaque. La prise en compte de la rotation des lamelles et d'une paroi exposée vitrée supplémentaire impliquerait des seuils de coefficient d'ombrage différents.

- L'efficacité du système HVAC est basée sur un modèle théorique COP/EER d'une pompe à chaleur AIR-AIR ; l'adoption d'un autre type de pompe à chaleur avec une efficacité différente donnera des résultats différents.

4. Perspectives de la recherche

Cette étude ouvre la voie à d'autres axes d'investigation qui méritent d'être explorés ; soit pour affiner certains aspects, qui faute de temps, de moyens ou tout simplement pour ne pas déborder du sujet, n'ont pas été développés au-delà de certaines limites ; soit pour lancer la recherche sur de nouvelles pistes susceptibles d'apporter un éclairage différent à des questions qui resteront toujours d'actualité. Nous estimons que les axes de recherche suivants mériteraient d'être développés :

- Examiner différents bâtiments de bureaux comme cas d'étude avec différents ratios S/V (coefficient de forme) et des paramètres de fonctionnement avec des horaires d'occupation multiples.
- Mettre en œuvre le coût de l'énergie et des composants comme paramètres de définition de la solution optimale.
- Adopter différentes solutions d'isolation et appliquer une approche de coût global supplémentaire pour définir la solution optimale sur le cycle de vie.
- Aborder le concept d'auto-ombrage dans une perspective géométrique.
- Des solutions de murs plus applicables avec différentes stratifications correspondant au contexte peuvent être considérées pour définir une configuration de construction plus réaliste et mieux adaptée.
- Augmenter la précision du confort visuel en considérant le facteur de lumière du jour dans l'espace de travail comme un paramètre pondéré avec l'optimisation énergétique.

Bibliographie

Bibliographie

Abdul Hamid, M. F., Ramli, N. A. and Kamal, N. M. F. S. An Analysis of Energy Performance of a Commercial Building Using Energy Modeling. Kuala Lumpur, Malaysia, IEEE, 2017, pp. 105-110. DOI: 10.1109/CENCON.2017.8262467

Akinbami, J. F., & Lawal, A. (2009, June). Opportunities and challenges to electrical energy conservation and CO₂ emissions reduction in Nigeria's building sector'. In Fifth Urban Research Symposium, Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda (pp. 28-30).

Aksamija, A. (2013). Sustainable facades: Design methods for high-performance building envelopes. John Wiley & Sons.

Alawadhi, E.M. Effect of an Incompletely Closed Window Shutter on Indoor Illuminance Level and Heat Gain. Energy Build. 2016, 110, 112–119

Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, r

Alwetaishi, M. (2019). Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 31(1), 6-18. esearch questions. Energy Procedia, 91, 269-275.

Alwetaishi, M., Al-Khatri, H., Benjeddou, O., Shamseldin, A., Alsehli, M., Alghamdi, S., & Shrahily, R. (2021). An investigation of shading devices in a hot region: A case study in a school building. Ain Shams Engineering Journal, 12(3), 3229-3239.

Anastaselos, D., Oxizidis, S., & Papadopoulos, A. M. (2017). Suitable thermal insulation solutions for Mediterranean climatic conditions: a case study for four Greek cities. Energy Efficiency, 10(5), 1081-1098.

APRUE. 2019. Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Chiffres clés Année 2017. ALGER : APRUE, 2019 <https://www.mteer.gov.dz/Documents/aprueconsommation.pdf>

Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2011). Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 460-470.

Asan, H. (2000). Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. Energy and Buildings, 32, 197–203

ASHRAE (1999), ASHRAE Standard : Energy standard for buildings except low-rise Residential Buildings, ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1999

ASHAE. ASHRAE Handbook Fundamentals 2017; American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHAE): Atlanta, GA, USA, 2017.

Aste N, Leonforte F, Manfren M, Mazzon M. Thermal inertia and energy efficiency – parametric simulation assessment on a calibrated case study. *Appl Energy* 2015;145:111–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.084>

Aste, N., Buzzetti, M., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2018). Glazing's techno-economic performance: A comparison of window features in office buildings in different climates. *Energy and Buildings*, 159, 123-135. <https://sci-hub.se/10.1016/j.enbuild.2017.10.088>

Badarnah, L. (2017). Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation. *Buildings*, 7(2), 40.

Badarnah Kadri, L. 2012. « Towards the LIVING Envelope: Biomimetics for Building Envelope Adaptation ». Delft University of Technology. <https://doi.org/10.4233/UUID:4128B611-9B48-4C8D-B52F-38A59AD5DE65>.

Badeche, M., & Bouchahm, Y. (2020). Design optimization criteria for windows providing low energy demand in office buildings in Algeria. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6, 100024. <https://sci-hub.se/10.1016/j.indic.2020.100024> <https://sci-hub.se/10.1016/j.buildenv.2016.11.021> <https://sci-hub.se/10.1016/j.indic.2020.100024> <https://sci-hub.se/10.1016/j.indic.2020.100024>

Bahrani, S. (2008) Energy efficient buildings in warm climates of the Middle East: MsC thesis in Environmental Management and Policy, Lund, Sweden.

Bendara, S., Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Belaid, S., Hamdani, M., Cherier, M. K., & Benamrane, N. (2019). Energy Efficiency and Insulation Thickness According to the Compactness Index Case of a Studio Apartment Under Saharan Weather Conditions. *Journal of Solar Energy Engineering*, 141(4).

Benlatreche, Toufik. "Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics." (2006).

Benslimane, M., Hamimed, A., Zerey, W. E., Khaldi, A., & Mederbal, K. (2009). Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(3).

Bersi, M, Climatologie, support de cours Climatologie, université Ferhat Abbas, Setif

Betti, G., Tartarini, F., Schiavon, S., Nguyen, C. (2021). CBE Clima Tool. Version 0.4.6. Center for the Built Environment, University of California Berkeley

Bilan National de l'énergie (2019), Ministère de l'Énergie et des Mines <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>

Bojic, M, Yik, F, Sat, P, Influence of thermal insulation position in building envelope on the space cooling of high-rise residential building in Hong Kong, *Energy and Buildings* 33 (2001) 569–581.

Bokel, R.M.J. The Effect of Window Position and Window Size on the Energy Demand for Heating, Cooling and Electric Lighting. In Proceedings of the IBPSA 2007—International Building Performance Simulation Association, Beijing, China, 3–6 September 2007

Bothe, O. (2018). What even is Climate?. *Geoscience Communication Discussions*, 1-18.

Bouamama Wahiba, (2013) Au sujet de la politique d'efficacité énergétique en Algérie : Approche systématique pour un développement durable. Cas de : Programme ECO-BAT, Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen.

Boursas Abderrahmane, (2013) Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation à l'aide d'un logiciel de simulation ; Mémoire de Magistère Thermique du bâtiment, Université de Constantine

Brahmanand Mohanty, Climat tropical, climat chaud : une définition claire mais difficile, *Construction 21*.

Brittle, J. P. (2017). *Passive system integration for office buildings in hot climates* (Doctoral dissertation, Loughborough University).

Brundtland, G. HCai. (1987b). World Commission on environment and development: our common future. Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294.

Capeluto, I. G., 2003. Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy and Buildings*, Volume 35, pp. 327-336.

Capeluto, G., & Ochoa, C. E. (2016). *Intelligent envelopes for high-performance buildings: Design and strategy*. Springer.

Caruso, G. & Kämpf, J. H., 2015. Building shape optimisation to reduce air-conditioning needs using constrained evolutionary algorithms. *Solar Energy*, Volume 118, pp. 186-196

Certu Memento technique du bâtiment-les façades (2003)

Chegut, A., Eichholtz, P., & Kok, N. (2019). The price of innovation: An analysis of the marginal cost of green buildings. *Journal of Environmental Economics and Management*, 98, 102248.

Childs, K. W., G. E. Courville, et al. (1983). Thermal mass assessment: An explanation of the mechanisms by which building mass influences heating and cooling energy requirements. Oak Ridge National Laboratory Tennessee USA, U.S. Department of Energy.

Clarke, J. A. (2001). *Energy Simulation in Building Design*. Oxford, Butterworth-Heinemann.

Claude, S., Ginestet, S., Bonhomme, M., & Escadeillas, G. (2020). Performance of bio-based insulation materials in an old building envelope system. In *Bio-based Materials and Biotechnologies for Eco-efficient Construction* (pp. 105-128). Woodhead Publishing.

Dakhia, A. (2019). L'analyse du cycle de vie, comme stratégie de développement d'un bâtiment durable dans les milieux arides à climat chaud et sec. Cas de la ville de Biskra (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).

D'Agostino, D.; Rossi, F.D.; Marigliano, M.; Marino, C.; Minichiello, F. Evaluation of the optimal thermal insulation thickness for an office building in different climates by means of the basic and modified 'cost-optimal' methodology. *J. Build. Eng.* **2019**, *24*, 100743

De Martonne, E. (1926) Aréisme et Indice d'aridité. Comptes Rendus de L'Academy of Science, Paris, 1395-1398.

Donald Watson, Bioclimatic Design, Encyclopedia of sustainability science and technologie, second edition. Robert A. Meyers (ed.) 2017

Dudzińska, A. (2021). Efficiency of Solar Shading Devices to Improve Thermal Comfort in a Sports Hall. *Energies*, *14*(12), 3535.

Elaiab, F. M. (2014). Thermal comfort investigation of multi-storey residential buildings in Mediterranean climate with reference to Darnah, Libya (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

Elsadig, A. K. (2005). Energy efficiency in commercial buildings. United Kingdom: University of Strathclyde.

EN 15251:2007—Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. iTeh Standards Store.

Erebor, E. M., Ibem, E. O., Ezema, I. C., & Sholanke, A. B. (2021, March). Energy Efficiency Design Strategies in Office Buildings: A Literature Review. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 665, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.

S.R Ersoy, J.Terrapon-Pfaff (2021), Le système énergétique de l'algérie. Développement d'un modèle de phase pour une transformation durable.

Eurelectric. A Forward Looking Primary Energy Factor for a Greener European Future. https://www.eurelectric.org/media/2382/2018_industry_association_position_on_pef_revision-2018-030-0114-01-e-h-216CBE01.pdf

Eurocoustics (2017), certification environnementales des bâtiments LEE, BREEM et NF HQE, https://www.eurocoustic.com/sites/eurocoustic.com/files/field_document/brochure_environnementale_technique_eurocoustic.pdf

Faggal, A. A., Moustafa, A. M., & Arafat, M. Y. Effect of different windows' glazing types on energy consumption of a residential building in a hot-arid climate.

Fallah H. Determining the Most Efficient Window-to-Wall Ratio in Southern Façade of Educational Buildings in Kerman. *Naqshejahan- Basic Stud New Technol Archit Plan* 2019;9:105– 15.

Farrell, D. & Remes, J. (2008) How the world should invest in energy efficiency. McKinsey & Co.

Fasi, M.A.; Budaiwi, I.M. Energy Performance of Windows in Office Buildings Considering Daylight Integration and Visual Comfort in Hot Climates. *Energy Build.* 2015, 108, 307–316

Feustel HE (1995) Simplified numerical description of latent storage characteristics for phase change wallboard. Indoor environmental program, University of California, CA, USA.

Ferrari S. Building envelope and heat capacity : re-discovering the thermal mass for winter energy saving. In: Proceedings of PALENC Conf 28th AIVC conference, building low energy cooling and ventilation technologies in the 21st century. Vol. 1; 2007. p. 346–51.

Freewan, A. A. (2014). Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. *Solar Energy*, 102, 14-30.

Gamboa-H, J. D. (2016). Analyse comparative de l’approche bioclimatique et de la méthode LEED en architecture. (M.Sc.A) Université de Montréal.

Garde F., David M., Adelard L., Ottenwelter E., Elaboration of Thermal Standards for French Tropical Islands: Presentation of the PERENE Project, in: Proceedings of Clima 2005, pp. 71–83, 2005, Lausanne, Switzerland.

George Baird, Michael R. Donn, Frank Pool William D.S.Brandner, Chan Seong Aun, Energy Performance of Buildings. Boca Raton CRC Press c1984 (p. 25-51)

Ghodeswar, S., Pandey, M., & Gupta, R. (2017). Concept and method for energy efficient building: an overview.

Givoni, B. (1994). *Passive low energy cooling of buildings*. John Wiley & Sons.

Global status report for buildings and construction (2021),
<https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>

Goia, F. (2016). Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Solar Energy*, 132, 467-492.

Goldman, S., Ungar, L., Capanna, S., & Simchak, T. (2012). Energy efficiency: a tool for climate change adaptation. Alliance to Save Energy, Washington, DC.

Gorgolewski, M (2007), “ Framing Systems and Thermal Mass” issue of Advantage Steel, published by the Canadian Institute of Steel, Modern Steel Construction, www.cisc-icca.ca.

Grynning, S., Gustavsen, A., Time, B., & Jelle, B. P. (2013). Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?. *Energy and buildings*, 61, 185-192.

Guide de la labellisation au standard bâtiment passif / passivhaus résidentiel collectif et tertiaire, 2016

Guidelines Accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 Supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings by Establishing a Comparative Methodology Framework for Calculating Cost-Optimal Levels of Minimum Energy Performance Requirements for Buildings and Building Elements; European Commission: Brussels, Belgium, 2012; p. 28.

Gregory. K, Moghtaderi. B, Sugo. H, Page. A, Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential construction systems, *Energy and Buildings* 40 (2008) 459–465.

Hamdani, M. (2016). Choix de l’Orientation et des Matériaux de Construction en Vue d’Améliorer les Performances Thermiques des Bâtiments (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid).

Hamza, N. A. (2004). The performance of double skin facades in office building refurbishment in hot arid areas (Doctoral dissertation, Newcastle University).

Harputlugil, T., & de Wilde, P. (2021). The interaction between humans and buildings for energy efficiency: A critical review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101828.

Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2007). Construire des façades. PPUR presses polytechniques.

Hu, R., Liu, G., & Niu, J. (2020). The Impacts of a Building’s Thermal Mass on the Cooling Load of a Radiant System under Various Typical Climates. *Energies*, 13(6), 1356.

Hu, M. (2019, May). Unintended consequences of current net zero energy building practice. In ARCC Conference Repository.

Huang. L, Zhu. Y, Ouyang. B. Cao. B. A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices, *Building and Environment* 49 (2012) 304-309

IEA (2019), Perspectives for the clean energy transition, the critical role of buildings https://iea.blob.core.windows.net/assets/026bff1b-821d-48bc-8a0e-7c10280c62bc/Perspectives_for_the_Clean_Energy_Transition_2019.pdf

Ihara, T., Gustavsen, A., & Jelle, B. P. (2015). Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. *Applied Energy*, 158, 422-432.

- Imessad, K., Derradji, L., Messaoudene, N. A., Mokhtari, F., Chenak, A., & Kharchi, R. (2014). Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate. *Renewable energy*, 71, 589-597.
- Iwan, A. (2014). Energy efficient buildings in a hot and dry climate.: Improvment of traditional houses in Kurdistan region.
- Joffroy, T., Misse, A., Celaire, R., & Rakotomalala, L. (2017). Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal.
- Joseph Petersen, Katherine Cort, Sarah Widder, Pacific Northwest National Laboratory, "Mind the Gap: Summary of Window Residential Retrofit Solutions," ACEEE, 2016.
- Kandar, M. Z., Nimlyat, P. S., Abdullahi, M. G., & Dodo, Y. A. (2019). Influence of inclined wall self-shading strategy on office building heat gain and energy performance in hot humid climate of Malaysia. *Heliyon*, 5(7), e02077.
- Karlsen, L, Heiselberg, P, Bryn, I, Johra, H, Solar shading control strategy for office building in cold climate, *Energy and Building* 118 (2016) 316-328.
- Karlsson, J. Windows-Optical Performance and Energy Efficiency. Ph.D. Thesis, Faculty of Science and Technology, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2001.
- Kaynakli, O, 'A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 415–425, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.08.006.
- Khadraoui, M. A. (2019). Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique (Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride) (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- Khadraoui, M. A., & Sriti, L. (2019). The effect of cool paints and surface properties of the facade on the thermal and energy efficiency of buildings in a hot and arid climate. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 6(1), 127-140.
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: green building design and delivery*. John Wiley & Sons.
- Kossecka, E, Kosny, J, Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building, *Energy and Buildings* 34 (2002) 321–331.
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110038.
- Kraakman, L. (2016). Energetic effects of façade surface geometry.
- Krstić-Furundžić, A., Vujošević, M., & Petrovski, A. (2019). Energy and environmental performance of the office building facade scenarios. *Energy*, 183, 437-447.

- Laustsen, J. (2008). Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. *Buildings*, 1–85. <https://doi.org/10.1.1.378.1012>
- Latreche Sihem, Sriti Leila, 2018. The effect of building materials choice on the thermal comfort in the auto-produced individual housing in Biskra. *Journal of Building Materials and Structures* 4, 50–57. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1165204>
- Latreche, S. (2019). Étude et amélioration des performances climatiques de l'enveloppe architecturale en milieux chauds et arides. Cas de l'architecture domestique autoproduite à Biskra (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- Lavafpour, Y. & Sharples, S., 2015. Using Tilted Facade to Reduce Thermal Discomfort in a UK Passivhaus Dwelling for a Warming Climate. *Energy Procedia*, Volume 78, pp. 2232-2237.
- Lechner, N. (2014). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. John Wiley & Sons.
- Leonidaki, Konstantia. "Energy Efficiency in Urban Office Buildings." (2015). MSc Thesis International Hellenic University.
- Li, N.; Li, J.; Fan, R.; Jia, H. Probability of occupant operation of windows during transition seasons in office buildings. *Renew. Energy* 2015, 73, 84–91.
- Liébard, A. (2006). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Le Moniteur.
- Liu, S., Kwok, Y. T., Lau, K. K. L., Chan, P. W., & Ng, E. (2019). Investigating the energy saving potential of applying shading panels on opaque façades: A case study for residential buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 193, 78-91.
- Loonen, R. C. G. M., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Ménézo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015, November). Design for façade adaptability—Towards a unified and systematic characterization. In *Proc. 10th Energy Forum-Advanced Building Skins*, Bern, Switzerland (pp. 1274-84).
- Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 483-493.
- Manfren, M., Aste, N., Leonforte, F., Del Pero, C., Buzzetti, M., Adhikari, R. S., & Zhixing, L. (2020). Parametric energy performance analysis and monitoring of buildings—HEART project platform case study. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102296.
- Mansouri, O., Bourbia, F., & Belarbi, R. (2018). Influence de la réflectivité de l'enveloppe sur la demande énergétique des bâtiments et sur le confort thermique. *Nature & Technology*, (18), 33-42.

Marif Y., Ben Hammou M., Zerrouki M, Belhadj M., Thermal Performance of Internal and External Wall Insulation in Existing Buildings in the South of Algeria, ISESCO Journal of science and technology, V9, N°16, November (2013), 53-59.

McIntosh Maggie (2008), Sustainable building design skin.
https://soa.utexas.edu/sites/default/disk/technologies/technologies/09_03_fa_speck_mcintosh_ml.pdf

Medejerab, A., & Henia, L. (2011). Variations spatiotemporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord occidentale. *Courrier du savoir*, 11, 71-79.

meetMED (2020), Energy efficiency in buildings, Mitigation enabling energy transition in the MEDiteranean region https://www.rcreee.org/sites/default/files/meetmed_ee-in-buildings_v2final_0.pdf

Menka, H. S. (2017). Energy Efficient Glazed Façade Design Strategies for High-Rise Office Buildings in Erbil City (Master's thesis, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)).

Merhan SHAHDA, M. Self-Shading Walls to Improve Environmental Performance in Desert Buildings. 2020.

Mesloub Abdelhakim, Yaik-Wah Lim, and Mohd Zin Kandar. "Optimum glazing configurations for visual performance in Algerian classrooms under mediterranean climate." *Journal of Daylighting* 6.1 (2019): 11-22.

Missoum, M., Hamidat, A., & Loukarfi, L. Effect of integrating bioclimatic designs in rural housing on energy consumption of Chlef district (north-west of Algeria). *Energy*, 40,

Mokhtari, A., Brahimi, K., & Benziada, R. (2008). Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. *Journal of Renewable Energies*, 11(2), 307-315.

Montenegro Iturra, E. E. (2011). Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique.

Nguyen, T. & Aiello, M. (2013) Energy intelligent buildings based on user activity: A survey. *Energy and Buildings*. 56, 244.

Ochoa, C.E.; Aries, M.B.C.; van Loenen, E.J.; Hensen, J.L.M. Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Appl. Energy* 2012, 95, 238–245.

Ounis, S.; Aste, N.; Butera, F.M.; Pero, C.D.; Leonforte, F.; Adhikari, R.S. Optimal Balance between Heating, Cooling and Environmental Impacts: A Method for Appropriate Assessment of Building Envelope's U-Value. *Energies* 2022, 15, 3570. <https://doi.org/10.3390/en15103570>

- Ourghi, R., Al-Anzi, A. & Krarti, M. (2007) A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office building. *Energy conversion and management*, 48, 300-305
- Ozel, M., & Pihtili, K. (2007). Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations. *Building and Environment*, 42, 3051–3059
- Pai, M.Y, Siddhartha, Effect of building orientation and window glazing on the energy consumption of hvac system of an office building for different climate zones, *Int. J. Eng. Res. Technol.* 4 (2015), doi:[10.17577/IJERVT4IS090754](https://doi.org/10.17577/IJERVT4IS090754).
- Passive-On Project. (2007, July). The passivhaus standard in European warm climates: Design guidelines for comfortable low energy homes. July 2007, <http://www.passive-on.org/CD/1.%20Technical%20Guidelines/Part%201/Part%201%20-%20English.pdf>
- Patterson, Murray G. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy policy*, 1996, vol. 24, no 5, p. 377-390.
- Perez-Lombard, P., Ortiz, J. and Pout, C. A Review on Building Energy Consumption Information. *Energy and Buildings*, 40, 2007, pp. 394-398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- Pfafferott, J. & Herkel, S. (2007) Statistical simulation of user behaviour in low---energy office buildings. *Solar Energy*. 81, 676.buildings. *Solar Energy*. 81, 676.
- Poirazis, H., Blomsterberg, Å., & Wall, M. (2008). Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. *Energy and buildings*, 40(7), 1161-1170.
- Radha, Chro Hama. "Traditional houses energy optimization using passive strategies." *Pollack Periodica* 13.2 (2018): 185-194.
- Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9), 2356-2364.
- Rahmouni, S. (2020). Evaluation et Amélioration Energétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- Rais, M. (2020). Towards high-performance facade design an optimization approach for energy efficient residential building. (PhD. Thesis, Pecs, Hungary)
- Reilly, A., & Kinnane, O. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy*, 198, 108-121.
- Rendu, M. (2021). Méthodologies pour la caractérisation des performances thermiques d'éléments de façades à échelle réelle (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- Rivoire, M.; Casasso, A.; Piga, B.; Sethi, R. Assessment of Energetic, Economic and Environmental Performance of Ground- Coupled Heat Pumps. *Energies* 2018, 11, 1941.

Rodrigues, L. T. (2009). An Investigation Into the Use of Thermal Mass to Improve Comfort in British Housing (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

Roudsari, M.S.; Pak, M. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally- conscious design. In Proceedings of the 13th International IBPSA Conference, Lyon, France, 26–28 August 2013; pp. 3128–3135.

Sandak, A., Sandak, J., Brzezicki, M., & Kutnar, A. (2019). Bio-based building skin (p. 183). Springer Nature.

Santamouris, M, Argiriou, A, Daskalaki, E, Balaras, C, Gaglia, A. Energy characteristics and savings potential in office buildings, , Solar Energy Volume 52, Issue 1, January 1994, Pages 59–66, Solar Buildings
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9490081C>

Sawaisarje Gaurishankar. Lecture notes on climatology for Integrated Meteorological Training course, Pasha, Pune-8

Sayadi, S.; Hayati, A.; Salmanzadeh, M. Optimization of Window-to-Wall Ratio for Buildings Located in Different Climates: An IDA-Indoor Climate and Energy Simulation Study. *Energies* 2021, 14, 1974. <https://doi.org/10.3390/en14071974>

Shaeri J, Habibi A, Yaghoubi M, Chokhachian A. The optimum window-to-wall ratio in office buildings for hot-humid, hot-dry, and cold climates in Iran. *Environ - MDPI* 2019. <https://doi.org/10.3390/environments6040045>.

Shahdan, M. S., Ahmad, S. S., & Hussin, M. A. (2018, February). External shading devices for energy efficient building. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 117, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.

Sharaf, F. (2020). The impact of thermal mass on building energy consumption: A case study in Al Mafrqa city in Jordan. *Cogent Engineering*, 7(1), 1804092.

Shen H, Tzempelikos A. Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter offices with automated shading. *Build Environ* 2013;59(1):303–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.028>

Susorova, I, Tabibzadeh, M, Rahman, A, Herek, L, Elnimeiri, C.M, The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings, *Energy and Buildings*, 57 (2013) 6-13.

Thalfeldt, M (2016). Total economy of energy efficient office building facades in a cold climate (Doctoral dissertation, University of Tallin)

Thermal Mass Benefits for Housing (2010), Cement, Concrete and aggregate, Australia, www.ccaa.com.au/LCA , (April 2010).

Tom De Saulles, 2012 Utilisation of Thermal mass in Non-Residential Buildings. Guidance on system design, floor types, surface finish and integration of service. Concrete Center.

- Torcellini, P. Pless, S. and Deru, M. (2006). Zero energy buildings: A critical look at the definition: preprint, American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE), 3 , Long Beach, California 14-18 August.2006, 275- 286.
- Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy and Buildings*, 203, 109434.
- Tukhtamisheva. A, Adilova. D, Banionis. K, A. Levinskytė, and R. Bliūdžius, ‘Optimization of the Thermal Insulation Level of Residential Buildings in the Almaty Region of Kazakhstan’, *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4692, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13184692.
- Tzempelikos A, Athienitis AK. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*. 2007;81:369-82.
- Ulgen K. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermo-physical properties on time lag and decrement factor. *Energy Build* 2002;34:273–8
- UNIDO (2012), "Sustainable Energy Regulation and Policymaking Tanning Manual", retrieved from <http://africa-toolkit.reep.org/modules/Module18.pdf>
- Verbeke, S.; Audenaert, A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 82, 2300–2318.
- Voll, H., & Seinre, E. (2014). A method of optimizing fenestration design for daylighting to reduce heating and cooling loads in offices. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5), 714-723.
- Watson, D. (2020). Bioclimatic design. In *Sustainable Built Environments* (pp. 19-41). New York, NY: Springer US.
- Wilkinson. S, Feitosa. R.C, Kaga. I.T, de Franceschi. I.H, ‘Evaluating the Thermal Performance of Retrofitted Lightweight Green Roofs and Walls in Sydney and Rio de Janeiro’, *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 231–240, 2017, doi:10.1016/j.proeng.2017.04.182.
- Williams, B. Atkinson, K. Garbesi, E. Page, Lighting controls in commercial buildings, *Leukos* 8 (3) (2012) 161e180. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1582/LEUKOS.2012.08.03.001> (accessed 23March 2016).
- WINES, J. (2000) *Green Architecture*. London, Taschen
- Wong E.W, Liao Z, “Investigating the Impact of Thermal Mass on Building Performance using Computational Simulation”, Department of Building Science, Ryerson University
- Wong IL, Eames PC, Perera RS. A review of transparent insulation systems and th evaluation of payback period for building applications. *Sol Energy* 2007;81(9): 1058–71. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004>.

Yao, J., & Yan, C. (2011, April). Effects of solar absorption coefficient of external wall on building energy consumption. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* (Vol. 76, pp. 758-760).

Yang, Z.; Liu, B.; Zhao, H. Energy saving in building construction in China: A review. *Int. J. Green Energy* 2004, 1, 209–225.

Zekraoui Djamel. (2017). L'impact de l'ouverture de la façade sur la consommation de l'énergie dans les bâtiments à usage de bureau sous un climat chaud et sec. Mémoire de magister présenté à université de Biskra, Algérie.

Zhang, Y.; Barrett, P. Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. *Build. Environ.* 2012, 50, 125–134.

Zhu L, Hurt R, Correia D, Boehm R. Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. *Energy Build* 2009;41:303–10.

Zhou, S, J. Zhao, J, 'Optimum combinations of building envelop energy-saving technologies for office buildings in different climatic regions of China', *Energy Build.*, vol. 57, pp. 103–109, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.11.019.

Sites web consultés

Archidesign <https://www.maisonsarchidesign.com>

Bruxelles environnement <https://environnement.brussels/bruxelles-environnement>
Certifications environnementales des bâtiments LEED®, BREEAM® et NF HQE
<https://www.eurocoustics.fr>

Centre de Développement des Energies Renouvelables, M.E.S.R.S, Réglementation Thermique Algérienne RETA V2.0 <https://reta.cder.dz/>

EESI Environmental and Energy Study Institute, <https://www.eesi.org/>

Effinergi , efficacité énergétique et confort dans le bâtiment.
<https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/bbc-effinergie>

Energy Sage, smarter energy decision <https://www.energysage.com/>

Bigladder software <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-8/input-output-reference/group-daylighting.html>

Global status report for buildings and construction (2021),
<https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>

Japan Sustainable Building Consortium (JSBC) and Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC), <https://www.ibec.or.jp/CASBEE>

Passive Design and Active Building Strategies, <https://www.sustainable.to/strategies>

The Concrete Centre, Gillingham House, London; <https://www.concretecentre.com/>

World Atlas <https://www.worldatlas.com/articles/what-is-an-arid-climate.html>

Organisation mondiale de la météorologie <https://public.wmo.int/fr>

Annexes

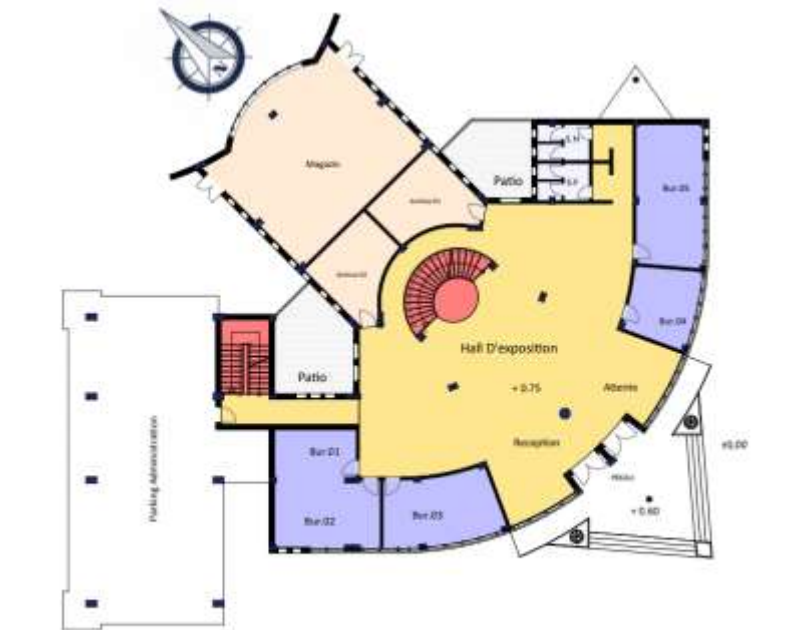
Annexe A

Documents graphiques de l'échantillon de bâtiments de bureau étudiés (Photographie, Plans et Façades)

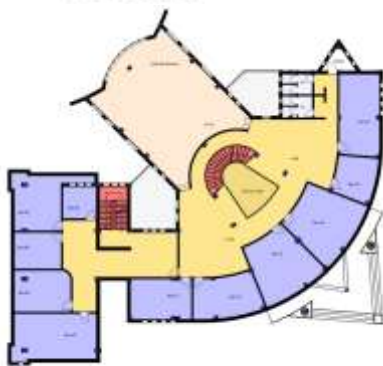
B1. Agence foncière « AWGRFU »



- Plans



PLAN RDC

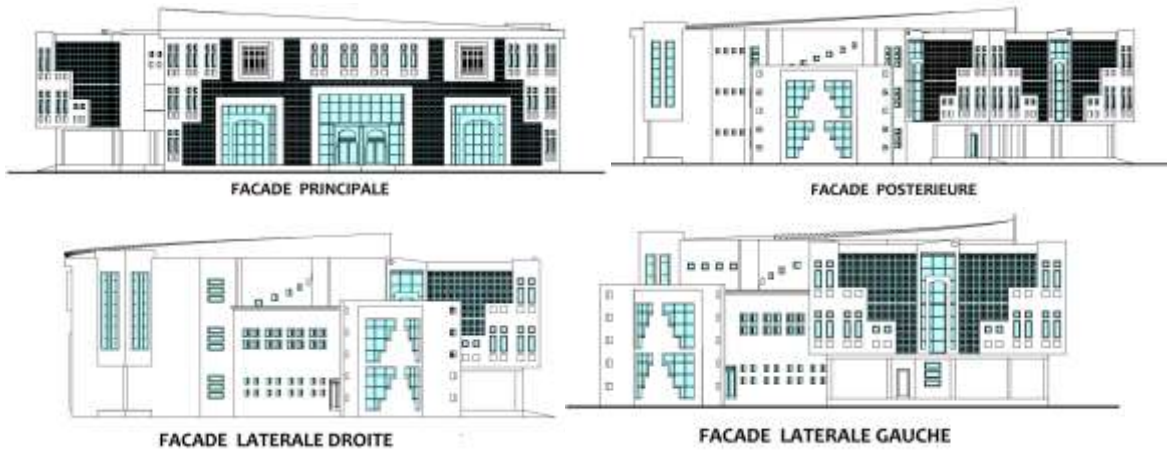


PLAN 1er ETAGE



PLAN 2ème ETAGE

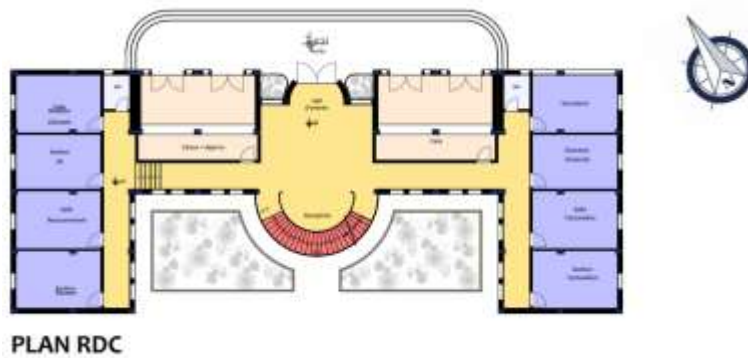
- **Façades**



B2. Algérienne Des Eaux « ADE » (Cas d'étude)



- **Plans**

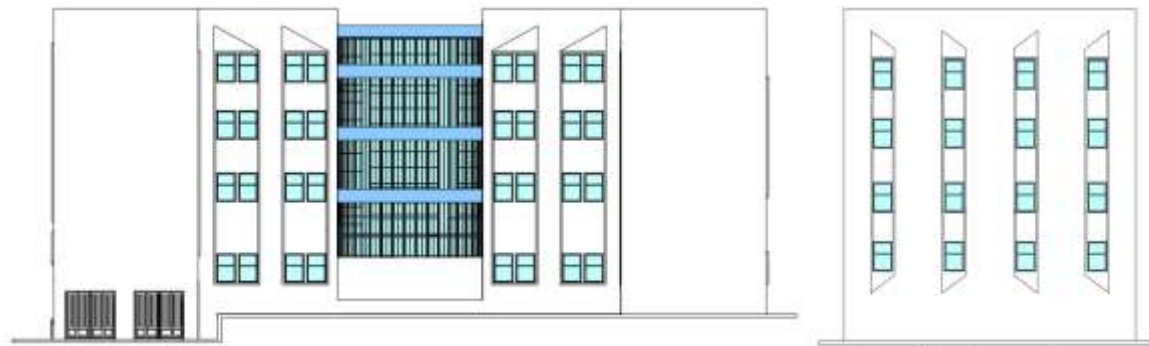




• **Façades**



Façade Principale



Façade Postérieure

Facades Laterales

- Informations additionnelles :
 - Mesures nette et brute

Element	Metric	SS	RDC	1er	2eme	3eme	Total
Plancher	Net floor area (m ²)	47.1	330.1	328.9	328.9	329.5	1364.7
	Gross floor area (m ²)	110.2	400.9	400.9	400.9	400.9	1714.1
Hauteur d'étage	Net height (m)	2.86	4.22	3.03	3.03	3.03	16.17
	Gross height (m)	3.06	4.42	3.23	3.23	3.23	17.17
Volume	net volume (m ³)	134.9	1232.4	996.8	996.8	998.38	4359.4
	gross volume (m ³)	337.3	1583.9	1295.1	1295.1	1295.1	5806.7

- Informations sur les charges internes du bâtiment
 - Equipment and éclairage artificiel

Element	RDC	1er	2eme	3eme	Puissance nominale
Lamps	236	256	256	236	18
AC	11	14	14	11	-
Caméras de sécurité				1	480
Desktop + utilities	18	12	12	11	320
Serveur				1	240

- Occupation + autres paramètres

Jours ouvrables			Dimanche à Jeudi
Heures de travail			8h00 à 16h30
Le bâtiment est entièrement occupé (+50% du personnel est présent)			7h par jour
Le bâtiment est partiellement occupé (20% à 45% du personnel est présent)			2h par jour pendant la pause de midi.
Estimation du nombre moyen de travailleurs par jour	Dans le bâtiment :		140
	Dans la salle de bureau		3
Sources d'énergie disponibles dans le bâtiment			Électricité
Contrôle de l'éclairage par l'utilisateur			Subjectif
Points de consigne du système HVAC			Subjectif
Couleurs des surfaces intérieures	Bureaux		Bleu / Beige
	Hall, Couloir		Gris clair
	Carreaux de sol		Blanc et bleu foncé

B3. Caisse nationale de Logement « CNL »



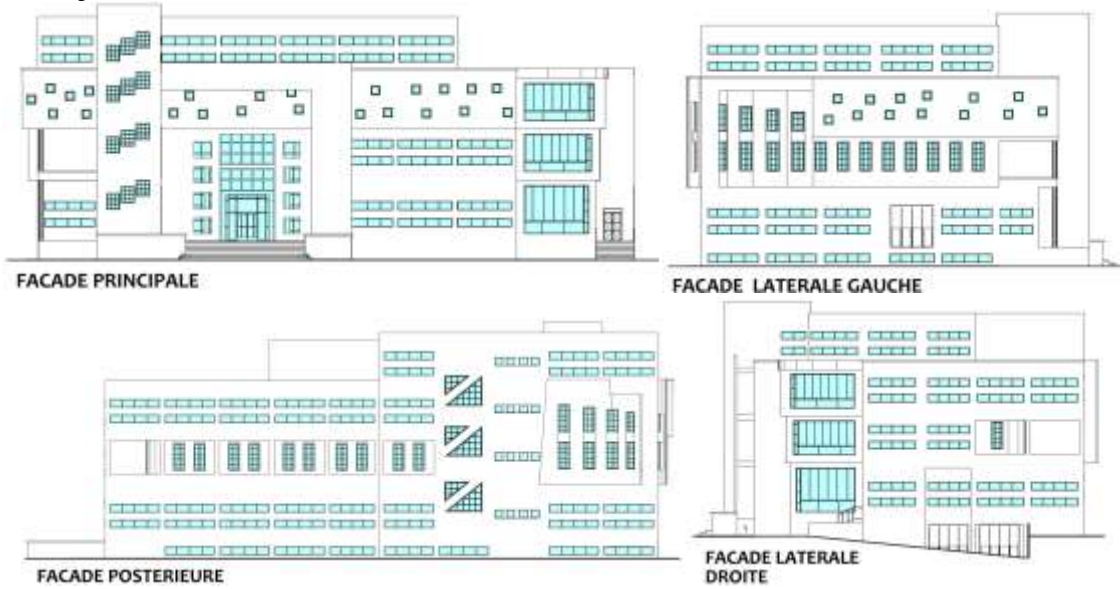
- **Plans**





PLAN RDC

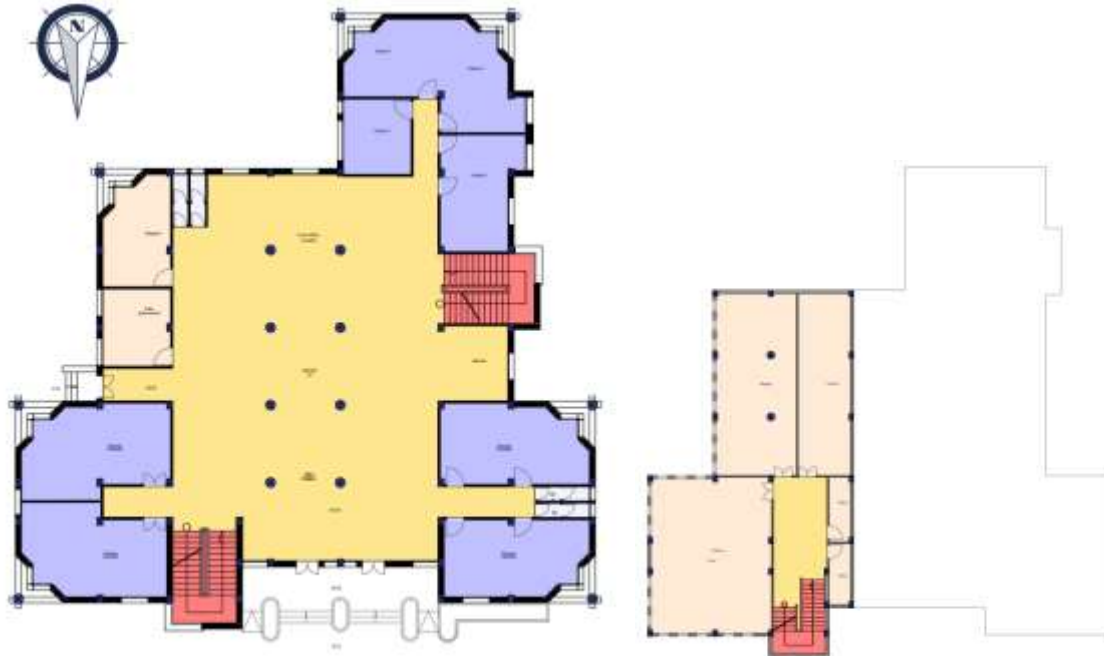
- Façades



B4. Centre Des Impôts « CDI »



- Plans



PLAN RDC

PLAN Sous:Sol

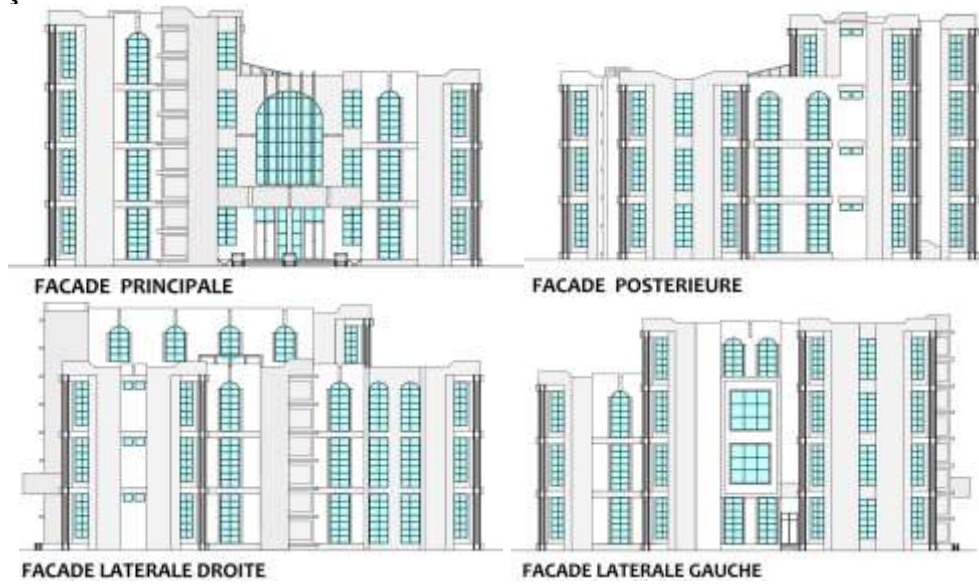


PLAN 1er ETAGE

PLAN 2eme ETAGE

PLAN 3eme ETAGE

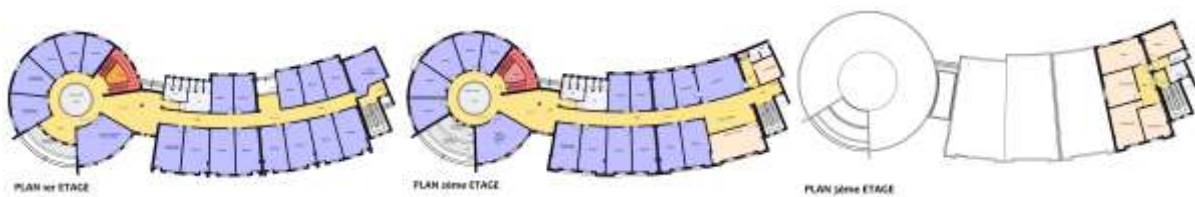
- **Façades**



B5. Centre des Finances « CF »



- **Plans**



B6. Direction de l'Hydrolique « DHW »



- Plans



PLAN RDC



PLAN 1er ETAGE



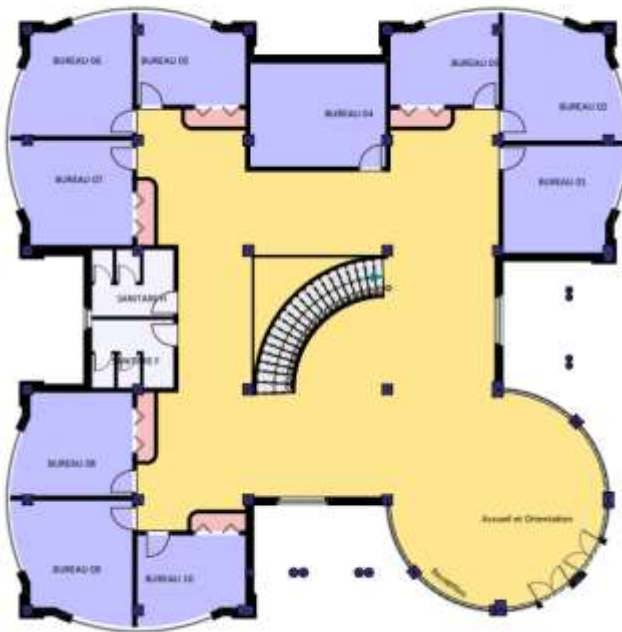
PLAN 2ème ETAGE



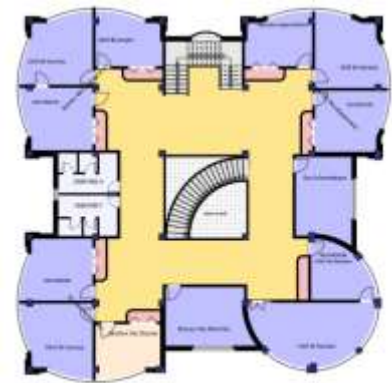
PLAN 3ème ETAGE

B7. Direction des travaux publics

- Plans



PLAN R.D.C

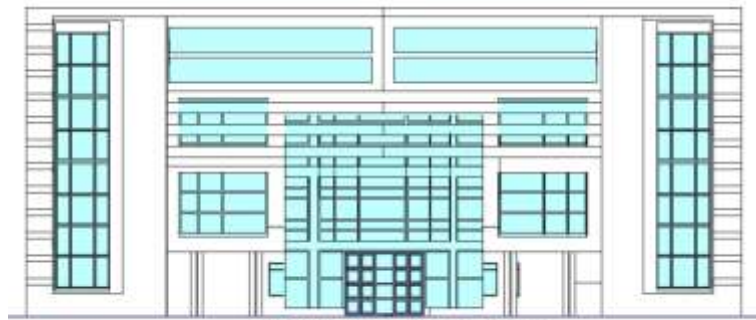


PLAN 1er & 2ème ETAGE

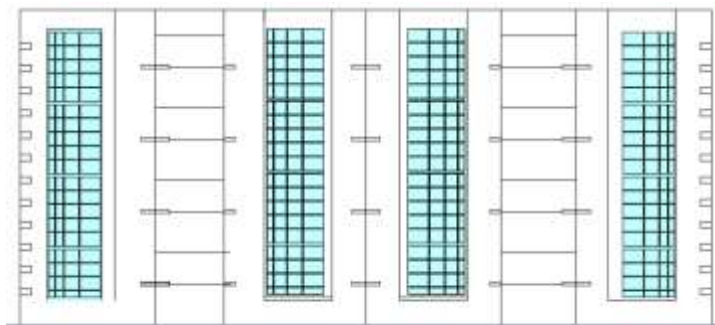


PLAN 3ème ETAGE

- **Façades**



FACADE PRINCIPALE



FACADE POSTERIEURE

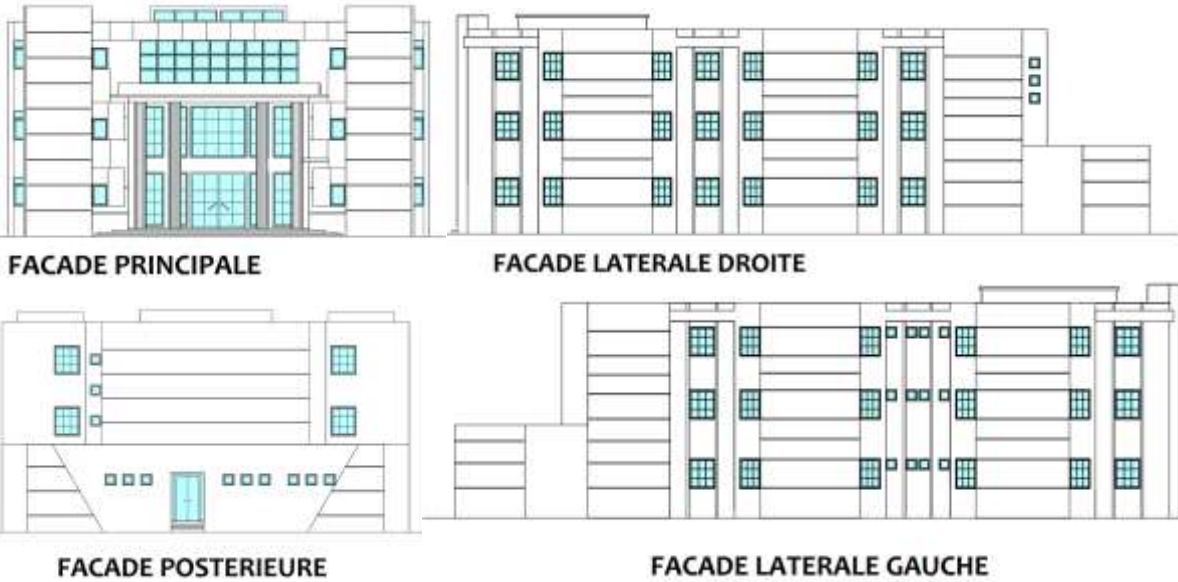
B8. Direction de l'Urbanisme de l'Architecture et de la Construction « DUAC »



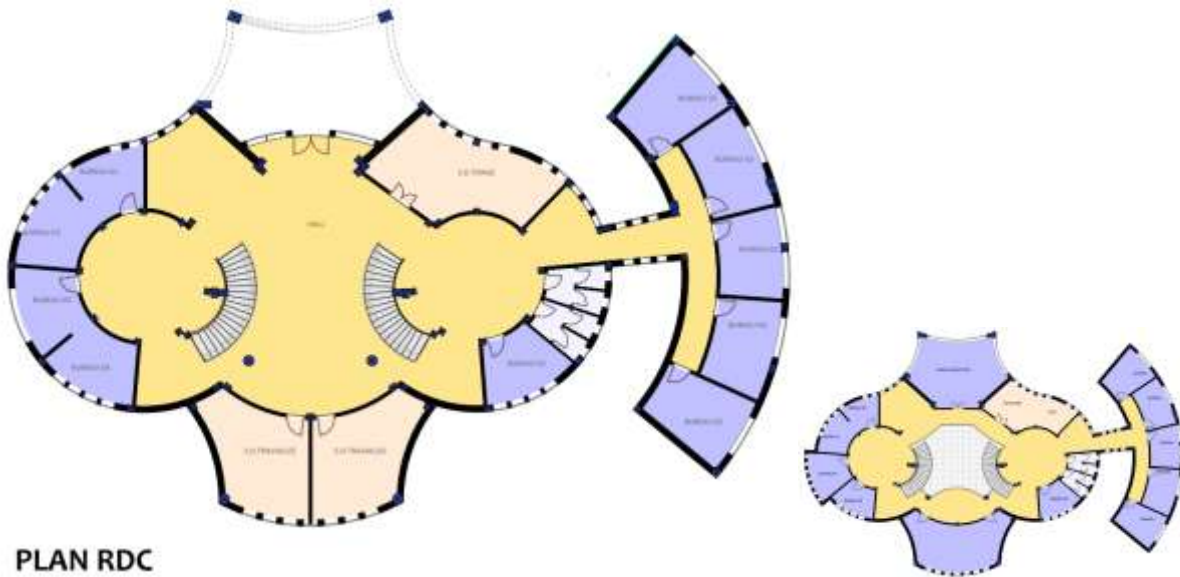
- Plans



- Façades



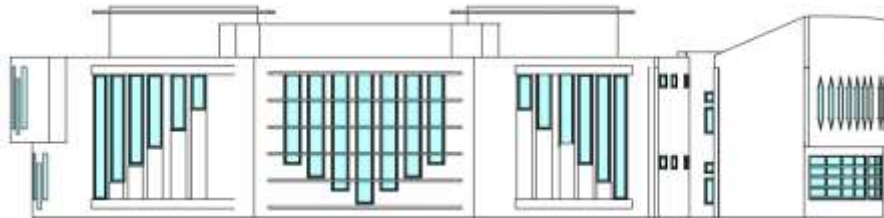
B9. Tribunal Administratif



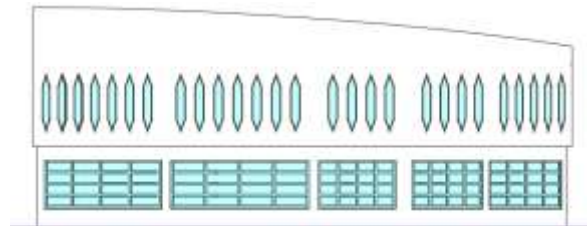
- Façades



Façade principale



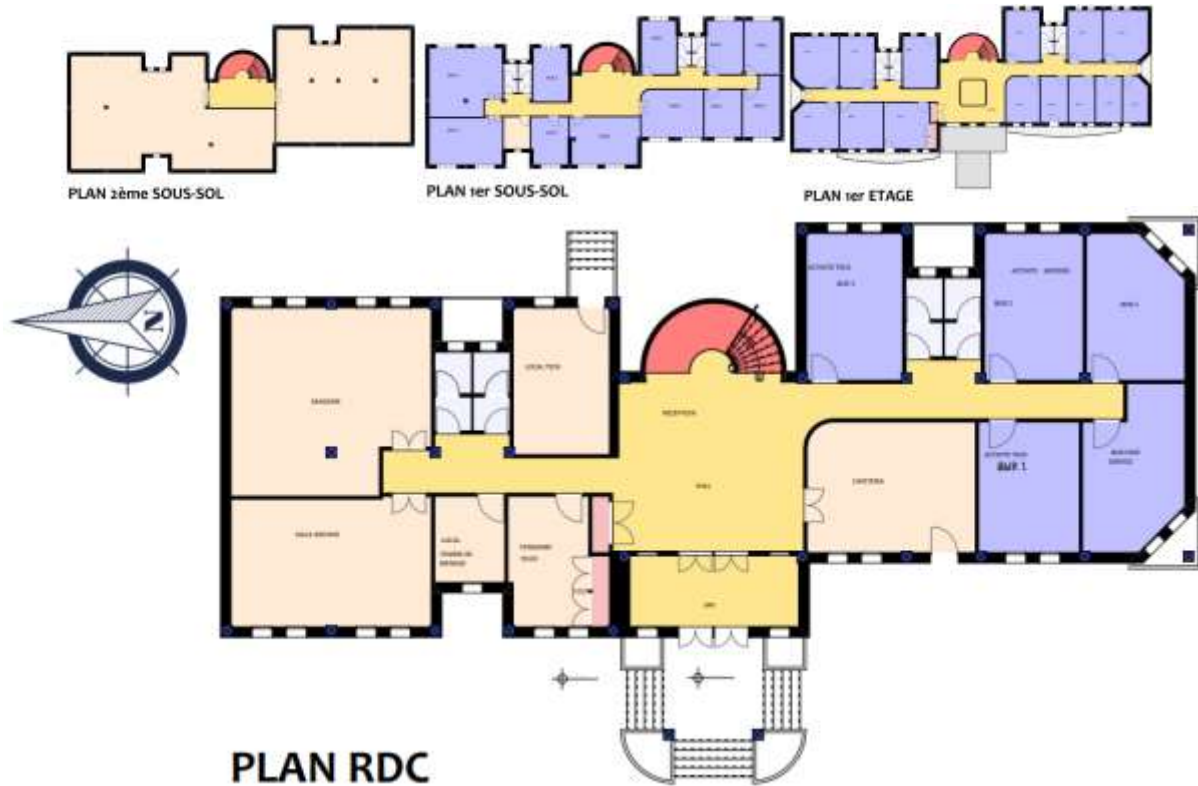
Façade Postérieure



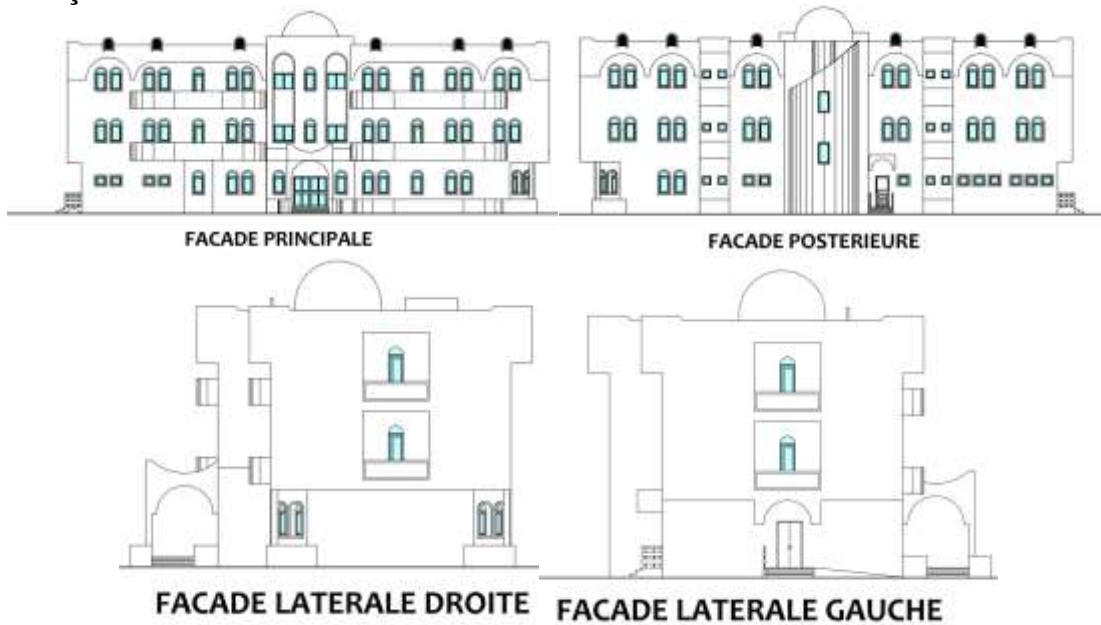
Façade laterale

B10. Siège d'affaires sociale SONATRACH

- Plans



- Façades



ANNEXE B

Résultats des solutions optimales d'ombrage des murs de façade opaques : Configuration et représentation

Dans les tableaux suivants, sont représentés les résultats de la solution optimale d'ombrage pour les murs opaques en considérant le scénario "mixte" avec des lamelles horizontales et verticales simultanément avec la configuration correspondante sur Rhinoceros/Grasshopper avec Ladybug&Honeybee. De plus, les résultats pour le refroidissement, le chauffage, le coefficient d'ombrage, l'irradiation solaire cumulée et le potentiel d'économie d'énergie annuels sont rapportés pour chacune des orientations spécifiques de l'étude de cas, et des considérations supplémentaires pour les orientations cardinales et sub-cardinales.

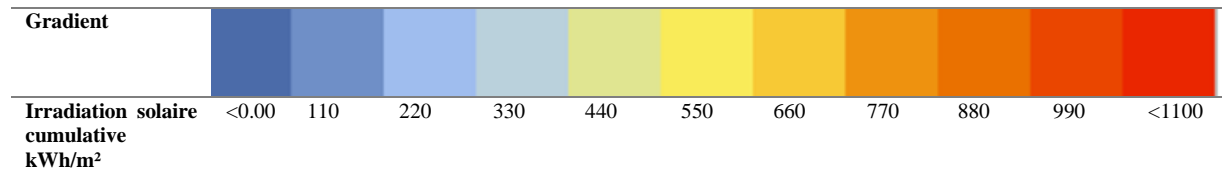


Tableau B.1 Légende : Valeurs de gradient d'irradiation solaire cumulées dans les représentations graphiques dans les Tableaux B.2 et B.3

• Orientations Cas d'étude

	Orientations	Nord-Est (58°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1.2
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m ²]		585.78	95.45
	Shading coefficient		-	0.16
	Refroidissement [kWh/m ² an]		18.52	17.9
	Chauffage [kWh/m ² an]		1.35	1.12
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	4.19%	
	Orientations	Sud-Est (148°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m ²]		1168.48	220.47
	Shading coefficient		-	0.19
	Refroidissement [kWh/m ² an]		19.37	17.83
	Chauffage [kWh/m ² an]		0.35	0.8
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	5.54%	

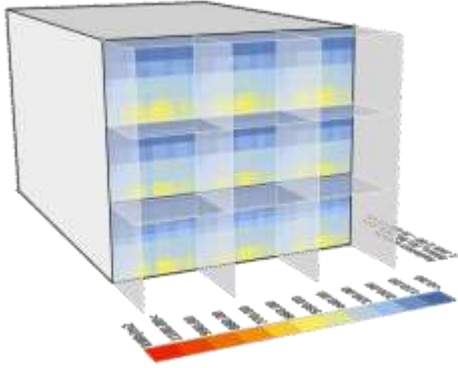
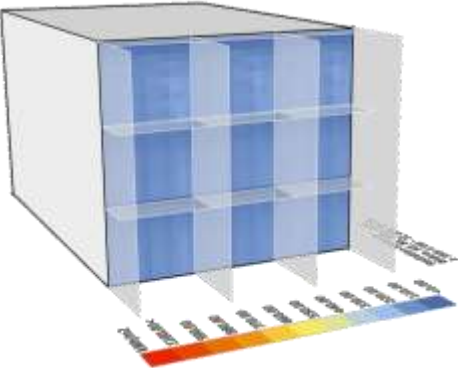
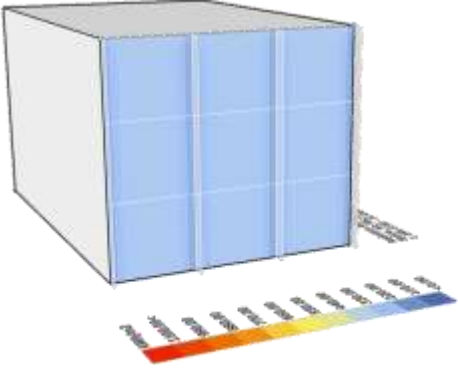
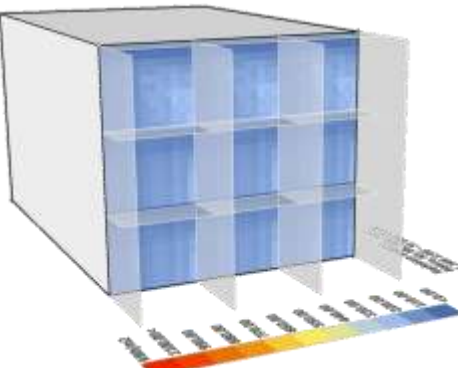
	Orientation	Sud-Ouest (238°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m²]		1056.4	235.81
	Shading coefficient		-	0.18
	Refroidissement [kWh/m²an]		19.41	17.96
	Chauffage [kWh/m²an]		0.56	0.86
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	5.76%	
	Orientation	Nord-Ouest (328°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	0.6
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m²]		382.93	91.51
	Shading coefficient		-	0.24
	Refroidissement [kWh/m²an]		17.78	17.64
	Chauffage [kWh/m²an]		1.48	1.17
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	2.31%	

Tableau B.2 Configuration optimale d'ombrage des façades opaques-orientations du cas d'étude

- Orientation

	Orientation	Nord (0°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	0
		Ailettes verticales	-	0.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m²]		274.34	246
	Shading coefficient		-	0.89
	Refroidissement [kWh/m²an]		17.27	17.72
	Chauffage [kWh/m²an]		1.50	1.13
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	0.45%	
	Orientation	Nord-Est (45°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	0.6
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m²]		410.5	246
	Shading coefficient		-	96.03
	Refroidissement [kWh/m²an]		17.88	17.25
	Chauffage [kWh/m²an]		1.47	1.43
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	1.17	

	Orientation	Est (90°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1.2
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m ²]		853.08	162.95
	Shading coefficient		-	0.19
	Refroidissement [kWh/m ² an]		19.22	18.12
	Chauffage [kWh/m ² an]		0.97	1.07
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	4.89%	
	Orientation	Sud-Est (135°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m ²]		1131.04	247.4
	Shading coefficient		-	0.22
	Refroidissement [kWh/m ² an]		19.46	17.89
	Chauffage [kWh/m ² an]		0.46	0.82
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	5.54%	
	Orientation	Sud (180°)	Sans ombrage	Optimal shading
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	0.6
		Ailettes verticales	-	0.4
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m ²]		1189.92	529.61
	Shading coefficient		-	0.44
	Refroidissement [kWh/m ² an]		19.11	17.89
	Chauffage [kWh/m ² an]		0.25	0.51
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	4.97%	
	Orientation	Sud-Ouest (225°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m ²]		1115.06	245.95
	Shading coefficient		-	0.22
	Refroidissement [kWh/m ² an]		19.39	17.86
	Chauffage [kWh/m ² an]		0.44	0.8
Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	5.88%	

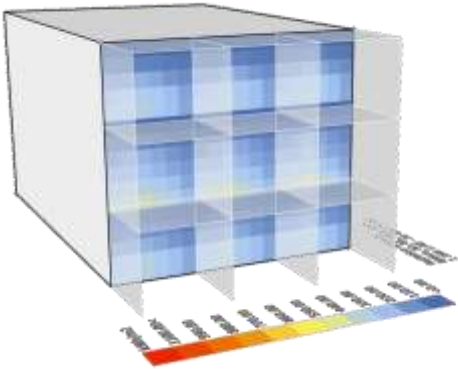
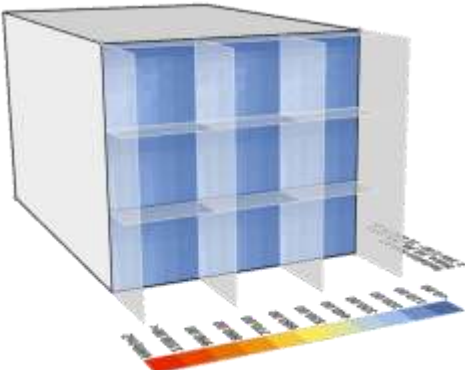
	Orientation	Ouest (270°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	1.2
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m²]		835.91	158.49
	Shading coefficient		-	0.19
	Refroidissement [kWh/m²an]		19.14	18.08
	Chauffage [kWh/m²an]		0.95	1.07
	Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	4.58%
	Orientation	Nord-Ouest (315°)	Sans ombrage	Optimal
	Longueur [m]	Lame horizontale	-	0.6
		Ailettes verticales	-	1.2
	Irradiation solaire cumulative [kWh/m²]		471.5	118.5
	Shading coefficient		-	0.25
	Refroidissement [kWh/m²an]		18.12	17.74
	Chauffage [kWh/m²an]		1.43	1.17
	Potentiel d'économie d'énergie [%]		-	3.30%

Tableau B.3 Configuration optimale d'ombrage des façades opaques- Orientation vers les points cardinaux et semi-cardinaux